

**DISEÑO, MODELAMIENTO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT TIPO SCARA
DE TRES GRADOS DE LIBERTAD**

**JUAN CAMILO PINEDA ATEHORTUA
DANIEL ESTEBAN YEPES AGUIRRE**



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PEREIRA, COLOMBIA
2018**

**DISEÑO, MODELAMIENTO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT TIPO SCARA
DE TRES GRADOS DE LIBERTAD**

**JUAN CAMILO PINEDA ATEHORTUA
DANIEL ESTEBAN YEPES AGUIRRE**

Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico

Director

Mauricio Holguín Londoño, Ing. M.Sc, Ph.D(C)

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PEREIRA, COLOMBIA
2018**

Nota de aceptación

Director
Ing. M.Sc, Ph.D(c) Mauricio Holguín Londoño

Firma del jurado

Director del programa de
Ingeniería Electrónica

Este proyecto de grado está dedicado a todas aquellas personas como familiares, amigos y profesores, que hicieron su aporte a nuestra educación y formación como ingenieros, durante el transcurso de la carrera.

AGRADECIMIENTOS

En esta ardua etapa de la Carrera de Pregrado en Ingeniería Electrónica, la redacción de la tesis, quiero agradecer a mis tutores los PhD. Mauricio Holguín Londoño y German Andrés Holguín Londoño, por su paciencia, motivación, criterio y aliento. Ha sido un privilegio contar con su guía y ayuda.

Quisiera agradecer especialmente al M. sc Joanni Medina Chavarría, por su asesoría, siempre dispuesta aun en la distancia, por sus ideas y recomendaciones.

Gracias a los amigos a los que he robado horas de compañía. Nombrarlos sería muy extenso y podría cometer algún olvido injusto. ¡Gracias amigos por estar ahí ¡

Y por encima de todo, y con todo mi amor, gracias a los míos por estar incondicionalmente conmigo durante estos extensos años. Gracias a mi padre Orlando, a mi madre Cecilia, a mis hermanos Oscar y Tata. Y gracias a los que viven y a los que ya no están. Gracias por todo, los quiero con todo mi corazón.

Juan Pineda

Quisiera agradecer muy enormemente al M. sc Joanni Medina, quien siempre estuvo ahí brindándonos su ayuda, su conocimiento y herramientas para que la culminación de este proyecto fuera posible, le deseo muchos éxitos en su continuo crecimiento como catedrático y como persona.

Ha toda mi familia, pero muy en especial a mi madre Nora Aguirre, que hizo de mí el futuro profesional en el que estoy próximo a convertirme, que con su dedicación y sacrificio supo sacarnos adelante a mí y mis hermanos, te amo eres mi mayor motivación.

Y como olvidar a mis amigos y compañeros de carrera, cuantas risas, alegrías, tristezas, rabias y demás sentimientos y recuerdos que vienen a mi mente de todos los momentos que viví en esta etapa de mi vida, tan maravillosa y tan fugaz, espero verlos de nuevo y mis mejores deseos para todos.

Daniel Yepes

Tabla de contenido

CAPÍTULO 1 PRELIMINARES	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
1.3 JUSTIFICACIÓN	4
1.4 OBJETIVOS	6
1.4.1 Objetivo general.....	6
1.4.2 Objetivos específicos	6
CAPÍTULO 2 MARCO TEORICO	7
2.1. HISTORIA DE LOS MANIPULADORES ROBÓTICOS.....	7
2.2. MORFOLOGIA DEL MANIPULADOR ROBÓTICO.....	8
2.2.1. Estructura mecánica.....	8
2.2.2. Trasmisiones:	10
2.2.3. Actuadores:.....	10
2.2.4. Sensores:	11
2.2.5. Elemento final:.....	12
2.3. DESCRIPCION DE POSICION Y ORIENTACION.....	13
2.3.1. Descripción de la posición:.....	13
2.3.2. Descripción de la orientación:.....	14
2.3.3. Matrices de rotación	15
2.3.4. Coordenadas y matrices homogéneas.....	16
2.4. CINEMATICA	18
2.4.1. Cinemática Directa	18
2.4.2. Cinemática Inversa.....	19
2.5. SISTEMAS DE CONTROL	22
2.5.1. Estructura del control PID.....	22
2.5.1.1. Control proporcional (P)	22
2.5.1.2. Control proporcional-integral (PI).....	23
2.5.1.3. Control proporcional-derivativo (PD)	23
2.5.1.4. Control proporcional-integral-derivativo (PID)	24
CAPÍTULO 3 ANALISIS CINEMATICO DEL MANIPULADOR	25

3.1.	CINEMÁTICA DIRECTA DEL MANIPULADOR DE 3GDL	25
3.2.	CINEMÁTICA INVERSA DEL MANIPULADOR DE 3 GDL	29
CAPÍTULO 4 CONTROL DE POSICIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS ACTUADORES DEL MANIPULADOR		33
4.1.	ESTRATEGIA DE CONTROL.....	33
4.2.	SIMULACIÓN Y SINTONIZACIÓN CONTROL MEDIANTE SIMULINK	34
4.3.	ACTUADORES USADOS EN EL MANIPULADOR.....	37
4.3.1.	Estructura de comunicación con los actuadores	39
4.3.2.	Rango de movimiento de los actuadores.....	40
4.3.3.	Dispositivo de comunicación USB2Dynamixel.....	40
CAPÍTULO 5 INTERFAZ GRAFICA DEL MANIPULADOR		42
5.1.	INTERFAZ GRAFICA DE USUARIO GUI	42
5.2.	GENERACION DE TRAYECTORIAS	44
CAPITULO 6 PRUEBAS DE OPERACIÓN DEL MANIPULADOR		45
7.1	ANALISIS DE LAS TRAYECTORIAS EJECUTADAS POR EL MANIPULADOR	45
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		50
7.1.	CONCLUSIONES.....	50
7.2.	RECOMENDACIONES.....	51
Bibliografía.....		52
ANEXO.....		53
1.	Datasheet del motor interno en los servomotores.....	53

DC-Micromotors
Precious Metal Commutation

4,5 mNm
6 W

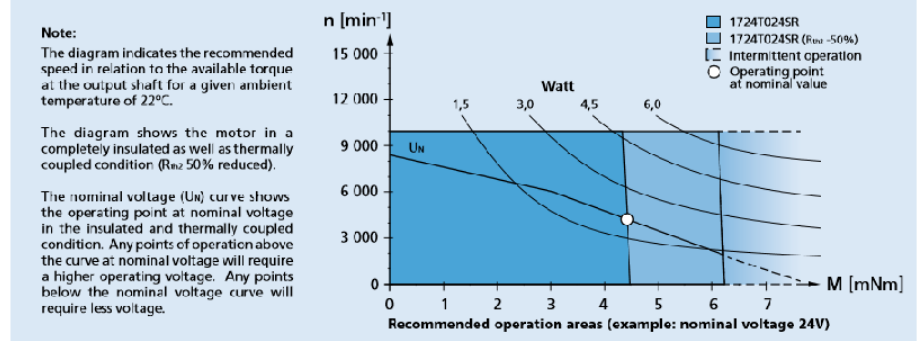
Series 1724 ... SR

Values at 22°C and nominal voltage		1724 T	003 SR	006 SR	012 SR	018 SR	024 SR		
1	Nominal voltage	U_N	3	6	12	18	24	V	
2	Terminal resistance	R	0,78	3,41	15,2	32,1	54,5	Ω	
3	Efficiency, max.	η_{max}	82	81	80	81	81	%	
4	No-load speed	n_0	8 200	8 600	7 900	8 400	8 600	min ⁻¹	
5	No-load current, typ. (with shaft ø 1,5 mm)	I_0	0,038	0,02	0,009	0,006	0,005	A	
6	Stall torque	M_{st}	13,2	11,5	10,5	11,2	11,5	mNm	
7	Friction torque	M_f	0,13	0,13	0,13	0,12	0,13	mNm	
8	Speed constant	k_n	2 760	1 450	656	472	362	min ⁻¹ /V	
9	Back-EMF constant	k_E	0,362	0,69	1,5	2,12	2,75	mV/min ⁻¹	
10	Torque constant	k_M	3,46	6,59	14,3	20,2	26,3	mNm/A	
11	Current constant	k_i	0,289	0,152	0,07	0,049	0,038	A/mNm	
12	Slope of n-M curve	$\Delta n / \Delta M$	621	748	752	750	748	min ⁻¹ /mNm	
13	Rotor inductance	L	21	75	350	710	1 200	μ H	
14	Mechanical time constant	τ_{me}	8	8	8	8	8	ms	
15	Rotor inertia	J	1,2	1	1	1	1	gcm ²	
16	Angular acceleration	α_{max}	110	110	100	100	100	10 ³ rad/s ²	
17	Thermal resistance	R_{th1} / R_{th2}	4 / 24,5						K/W
18	Thermal time constant	τ_{th1} / τ_{th2}	2,6 / 270						s
19	Operating temperature range:								
	– motor		-30 ... +85 (optional version -55 ... +125)						°C
	– winding, max. permissible		+125						°C
20	Shaft bearings		sintered bearings (standard)						
21	Shaft load max.:		ball bearings, preloaded (optional version)						
	– with shaft diameter		1,5						mm
	– radial at 3 000 min ⁻¹ (3 mm from bearing)		1,2						N
	– axial at 3 000 min ⁻¹		0,2						N
	– axial at standstill		20						N
22	Shaft play:								
	– radial	≤	0,03						mm
	– axial	≤	0,2						mm
23	Housing material		steel, black coated						
24	Mass		27						g
25	Direction of rotation		clockwise, viewed from the front face						
26	Speed up to	n_{max}	10 000						min ⁻¹
27	Number of pole pairs		1						
28	Magnet material		NdFeB						

Rated values for continuous operation

29	Rated torque	M_N	2,3	4,2	4,5	4,5	4,5	mNm
30	Rated current (thermal limit)	I_N	0,7	0,7	0,35	0,25	0,19	A
31	Rated speed	n_N	6 790	4 720	3 430	3 950	4 220	min ⁻¹

Note: Rated values are calculated with nominal voltage and at a 22°C ambient temperature. The R_{th2} value has been reduced by 0%.



For notes on technical data and lifetime performance refer to "Technical Information".
Edition 2017

© DR. FRITZ FAULHABER GMBH & CO. KG
Specifications subject to change without notice.
www.faulhaber.com

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de articulaciones (Barrientos, Peñin, & Balaguer, 2007)	19
Figura 2. Configuraciones más comunes (Barrientos, Peñin, & Balaguer, 2007)	19
Figura 3. Representación de la posición en el espacio (Aparicio Gonzalez & Orjuela Parra, 2005)	24
Figura 4. Posición y orientación en el espacio (Aparicio Gonzalez & Orjuela Parra, 2005)	25
Figura 5. Robot articular de 3 GDL	30
Figura 6. Codo arriba.....	31
Figura 7. Codo abajo	31
Figura 8. Localización de ejes coordenados	26
Figura 9. Bloque Simulink de la cinemática directa	28
Figura 10. Sub-bloque cinemática directa.....	39
Figura 11. Solución cinemática directa, Denavit-Hartenberg.....	29
Figura 12. Elementos 1, 2 y 3 del robot de la figura 8	30
Figura 13. Bloque de la cinemática inversa	32
Figura 14. Solución geométrica cinemática inversa	32
Figura 15. Modelo servomotor Simulink	33
Figura 16. Sistema de control PID multivariable	34
Figura 17. Sintonizador de control	35
Figura 18. Respuesta inicial del sistema.....	35
Figura 19. Respuesta del sistema para los parámetros establecidos	36
Figura 20. Constantes de control y parámetros del sistema	37
Figura 21. Asignación de pines (Robotis, 2006)	38
Figura 22. Conexión seria servomotores Dynamixel (Robotis, 2006)	38
Figura 23. Sistema de comunicación para la lectura y escritura de datos en los servomotores	39
Figura 24. USB Dynamixel con actuadores	40
Figura 25. Interruptor de tipo de comunicación.....	41
Figura 26. Diagrama de bloques, Modelo dinámico del manipulador de 3GDL.....	42
Figura 27. Simulación virtual del manipulador.....	43
Figura 28. Interfaz gráfica de usuario GUI	44
Figura 29. Gráfica comparativa trayectoria circular real y experimental	46

Figura 30. Trayectoria circular para la posición articular del actuador del primer gdl.....	48
Figura 31. Trayectoria circular para la posición articular del actuador del segundo gdl....	48
Figura 32. Trayectoria circular para la posición articular del actuador del tercer gdl.....	49
Figura 33. Manipulador físico	55

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de transmisores (Barrientos, Peñin, & Balaguer, 2007).....	10
Tabla 2. Características de actuadores (Barrientos, Peñin, & Balaguer, 2007).....	11
Tabla 3. Tipos de sensores internos (Barrientos, Peñin, & Balaguer, 2007).....	12
Tabla 4. Parámetro de Denavit-Hartenberg	26
Tabla 5. Estructura de control para la comunicación con los servomotores	39
Tabla 6. Trayectoria de prueba para el manipulador de 3 gdl	45
Tabla 7. Posición real y experimental de los puntos correspondientes a la trayectoria circular para cada articulación.	47

CAPÍTULO 1

PRELIMINARES

1.1 INTRODUCCIÓN

La introducción de los microprocesadores alrededor de los años 70, hizo posible que los avances en el campo de la robótica tuvieran un incremento del 80% para la década de los 80, haciéndose llamar esta “el primer año de la era robótica”, y fue de igual forma en esta década, para el año de 1982, donde el profesor Makino de la Universidad Yamanashi de Japón, introduce el concepto de robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm), todo en la búsqueda de un modelo de robot que pudiera ser diseñado con un bajo número de actuadores (grados de libertad), además de un costo reducido y que su construcción se basara en el ensamble de eslabones (Gonzalez & Lopez, 2004).

En concordancia con lo anterior se opta por implementar en este proyecto un prototipo icónico en la robótica, el robot tipo SCARA, el cual contará con 3 GDL, implementados cada uno por servomotores de la familia Dynamixel®, que permitirá recibir y censar diferentes parámetros necesarios para determinar la precisión y posición generada por el prototipo en el momento de ejecutar una trayectoria; la cual será vital para la implementación del sistema de control propuesto para este diseño, permitiendo evaluar el error generado por los servos previo y póstumo a la integración del control.

La comunicación con el prototipo se establecerá a través del software Simulink® de MatLAB®, lo cual presenta un reto debido a que es muy poca la bibliografía presente acerca del desarrollo de robots similares controlados mediante esta interfaz. La comunicación será llevada a cabo mediante un protocolo de comunicación ‘Daisy chain’, que permitirá una transmisión de hasta 1MBPS, la cual es natural de los servos Dynamixel.

La interfaz hombre-máquina con la cual contará el sistema será diseñada mediante la herramienta GUIDE (GUI Development Environment) de MatLAB®, permitiendo el ingreso de las coordenadas y la visualización de la posición final del extremo del prototipo; esta interfaz estará sincronizada en tiempo real al sistema de comunicación del Simulink®, encargado de realizar la parte de procesamiento del modelo.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La industria de producción está en constante búsqueda de hacer de sus sistemas mucho más rentables y competentes en el mercado, esto ha conllevado a la automatización y actualmente más a la robotización de estos, reflejando beneficios tales como: reducción en el tiempo de ejecución de los procesos y simplificación de los mismos, aumento de producción, calidad y uniformidad en el producto, disminución de costos, entre otros.

Ahora bien, generalmente los sistemas físicos presentes no solo en el contexto de la industria de procesos, sino también presentes en cualquier otro contexto, cuentan en su dinámica con una alta naturaleza no lineal y altamente acoplada, lo que dificulta en gran medida alcanzar un modelo matemático de los mismos; sin embargo, muchos de estos sistemas pueden llegar a ser linealizados mediante ecuaciones diferenciales o en diferencias, lo que implica considerar una serie de aproximaciones que permiten que sistemas no lineales puedan considerarse lineales alrededor de un punto de operación; no obstante, dichas aproximaciones muchas veces contribuyen a que el modelo no consiga representar el verdadero comportamiento del sistema (Gonzalez de Duran, 2002), reflejando inconsistencias en la dinámica del mismo al momento de aplicarse algún tipo de controlador.

Por otra parte y ante la dificultad presente en el modelamiento de sistemas no lineales, existe otro proceder que da solución a este dilema; esto mediante el estudio y descripción de la cinemática y la dinámica del sistema; siendo éste uno de los focos de estudio de este proyecto; es decir, la implementación de dichos métodos de modelamiento con el fin de caracterizar matemáticamente un sistema de posicionamiento angular con tres (3) grados de libertad, para finalmente entrar a diseñar un Control PID Multivariable que compense el efecto de interacción entre las variables allí presentes (Marin López & Beboya Gonzalez, 2013), permitiendo el adecuado desempeño del sistema de forma fluida dentro de un área de trabajo delimitada, de acuerdo a una serie de ordenes programados con anterioridad o que son ejecutadas por el usuario.

Ahora bien, otra de las dificultades a resolver, es la implementación de la interfaz de comunicación con los actuadores Dynamixel por medio de Simulink®, pues si bien, este software permite la transmisión y recepción de datos en tiempo real, no

posee librerías completas que permitan interactuar plenamente con dichos actuadores. Por otra parte, MatLAB® posee unas cuantas librerías que permitirían la comunicación con los actuadores siempre que sea programada mediante texto plano, sin embargo, dicho estilo de programación es ajeno a la POO (Programación Orientada a Objetos) de Simulink®, por lo que se convierte en todo un reto lograr que el software procese tanto la cinemática directa e inversa con la cual se generara la trayectoria y posicionamiento para el manipulador, como también el sistema de control implementado y la comunicación entre el software y los servomotores.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Una vez conocida la complejidad que presenta la descripción matemática de sistemas con fuerte presencia de no linealidad en su dinámica, por medio de métodos convencionales como lo son las ecuaciones diferenciales o en diferencias, se hace necesario buscar nuevas metodologías que permitan superar dichos obstáculos de modelamiento y control a los que se enfrentará el investigador habitualmente en la industria; ahora bien, es cierto que comercialmente existe una gran variedad de sistemas o robots manipuladores que satisfacen muchas de las exigencias de la industria, es decir, rapidez, precisión, calidad, reducción de costos, etc....; tanto así, que se puede llegar a pensar que realizar investigaciones y estudios respecto a este tema pareciera innecesario; sin embargo, se trata de un área extensa y de muy alto interés para el investigador, más aun cuando el referente apunta a aplicaciones con propósitos específicos que no pueden ser llevados a cabo por los robots presentes en el mercado (Kelly, 2003).

En coherencia con lo anterior y después de una minuciosa investigación, se opta por implementar el método de Denavit Hartenberg (Denavit and Hartenberg, 1955) en función de obtener el modelo cinemático del sistema de posicionamiento angular de tres (3) grados de libertad que se desea controlar; dicha decisión se debe; y sin desestimar la existencia de otros métodos con quizás menor complejidad en su implementación; a que éste método en particular constituye un referente obligatorio en todo curso básico de robótica (Rossi, 2012). Pero además de la representación cinemática del robot se ha planteado durante muchos años tipos de controladores que bien puedan describir y representar correctamente con el menor error posible la trayectoria de un robot tras una entrada deseada; y es por esto que se plantea el diseño de un control PID multivariable el cual pueda dar solución a los problemas de no linealidad y de gran acoplamiento que existe entre los robots de varias articulaciones, lo cual el clásico control PID no podría satisfacer.

Es evidente que la configuración SCARA es muy común en el ámbito de la robótica, se podría llegar decir que se trata de un tema redundante, pero es bien sabido que cada persona que decide involucrase en un prototipo con configuración SCARA, va hacer uso de diferentes actuadores, sensores, controladores, protocolos de comunicación, entre otros; que le permitan un desempeño deseado del robot. Es por esto que para el desarrollo del proyecto se decide utilizar el software Simulink, con el fin de hacer que este genere todo el proceso matemático

de la cinemática del robot y a su vez se encargue de la comunicación con los actuadores del manipulador, si bien en la plataforma de MatLAB y Arduino existen librerías propias de los actuadores Dynamixel, Simulink no las posee, lo que hace más interesante el proyecto puesto que permitirá crear un programa desde cero, con la capacidad de controlar a plenitud el prototipo manipulador.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Diseñar, Modelar e Implementar un controlador PID multivariable para un robot manipulador tipo SCARA con al menos tres grados de libertad, el cual pueda ser controlado mediante el software Simulink.

1.4.2 Objetivos específicos

- Hallar un modelo matemático del sistema teniendo en cuenta los parámetros de la estructura mecánica del sistema, (dinámica, articulaciones, inercias, entre otros).
- Desarrollar e implementar un sistema de control PID multivariable para el posicionamiento de la estructura SCARA.
- Desarrollar una interfaz de usuario mediante GUIDE de Matlab™.

CAPÍTULO 2

MARCO TEORICO

2.1. HISTORIA DE LOS MANIPULADORES ROBÓTICOS

La palabra 'robot', proveniente del checo -robotnik: siervo o trabajador forzado-, La cual fue nombrada por primera vez por el dramaturgo Karel Capek, en su obra llamada Opilek, donde con esta palabra hacía referencia a un conjunto de máquinas destinadas a realizar labores de arduo trabajo; pero no fue hasta que el escritor Isaac Asimov, popularizo el término al relacionar la palabra robótica con incontables escritos de ciencia ficción (Zabala, 2010).

El surgimiento en concreto de los dispositivos electro-mecánicos se debió a la integración conjunta de dos tecnologías, los tele-operadores y el control numérico computarizado (C.N.C), que nacieron a mediados de la segunda guerra mundial con el fin de optimizar procesos de producción durante la guerra, los cuales requerían de una alta precisión y eficiencia; por otro lado, se buscaba librar al humano de realizar trabajos que pudieran atentar contra su integridad física (Olier Caproso, Avilés, & Hernández bello, 1999).

Pero no fue hasta marzo de 1954, donde el ingeniero de nacionalidad americana George C. Devol, estableció los principios para la construcción del primer robot industrial, que años más tarde en colaboración con su socio Joseph F. Engelberger, director de ingeniería de la división aeroespacial de la empresa Manning Maxwell y Moore, instalarían su primera máquina Unimate (1960), innovaciones que nacían en paralelo con los inventos asiáticos, que en poco tiempo superarían a los Estados Unidos, al ser los fundadores para la fecha de 1972, de la primera organización robótica del mundo, la Asociación de Robótica Industrial de Japón (JIRA), precedida dos años más tarde del Instituto de Robótica de América (RIA) (Barrientos, Peñin, & Balaguer, 2007).

El acrónimo SCARA significa "Selective Compliant Assembly Robot Arm", y el primer robot de este tipo fue diseñado y ensamblado en el laboratorio del profesor Hiroshi Makino, en la universidad Yamanashi en Japón en 1978; el cual se consideró un prototipo revolucionario, pues su simplicidad era algo único debido a que con menos movimientos podría lograr más, aun con una mayor velocidad y precisión.

Este robot fue apenas introducido en las líneas industrial hasta el año de 1981 y hasta ahora ofrece la mejor relación precio/desempeño en las aplicaciones de alta velocidad, además de generar un boom mundial puesto que el sistema de montaje flexible japonés, basado en el robot SCARA, generó producciones de electrónicos pequeños, creando productos que impulsaron la economía y cambiaron el mundo. De acuerdo con la Federación Internacional de Robótica (IFR), entre los años 2010 y 2014 las ventas promedio globales han ido incrementando a una tasa de crecimiento anual compuesto de 17%. La mayoría de estos robots están siendo utilizados en la industria automotriz y se prevé que estas cifras seguirán aumentando y se instalen alrededor de 1.3 millones de robots entre los años 2015 y 2018 (S.A, 2017).

2.2. MORFOLOGIA DEL MANIPULADOR ROBÓTICO

Todo tipo de robot independiente de su funcionabilidad está compuesto por diferentes partes, las cuales cumplen con una determinada función en su aplicativo, entre ellas están: estructura mecánica, transmisiones, sistema de accionamiento, sistema sensorial, sistema de control y elemento final; la configuración de los robots industriales usualmente se asemeja al cuerpo humano, es decir, posee un cuerpo y un brazo.

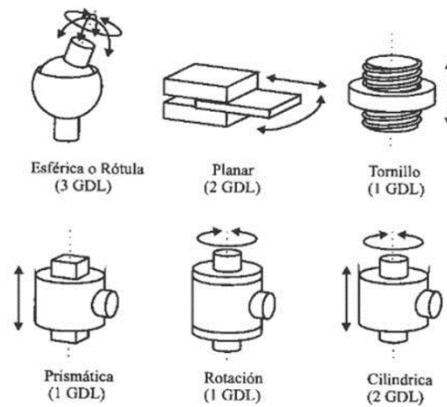
A continuación, se hace una descripción de cada una de las partes que conforman un robot.

2.2.1. Estructura mecánica

La estructura mecánica se refiere al tipo de articulación que posee el robot y el tipo de movimiento que estas generan; los segmentos que pueden moverse del robot están determinados por el número de articulaciones y a esto se le denomina grados de libertad (GDL). Las constituciones físicas de la mayor parte de los robots guardan cierta similitud con la anatomía del brazo humano, por lo que se hace correlación con el brazo, codo y muñeca.

El movimiento de las diferentes articulaciones que conforman el sistema mecánico puede ser de tipo lineal u rotacional, en algunas ocasiones la combinación de ambas, esto permite generar 6 tipos diferentes de articulaciones en base a un objetivo específico, como se muestra en la figura 1.

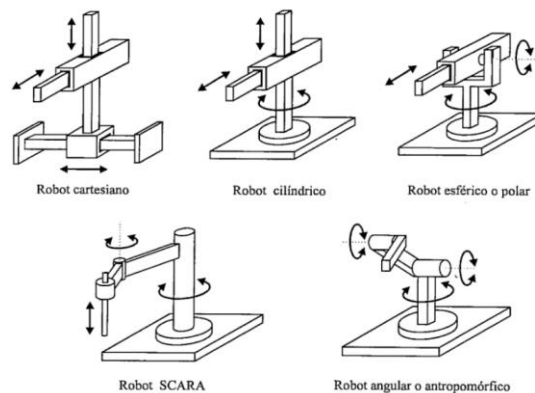
Figura 1. Tipos de articulaciones (Barrientos, Peñin, & Balaguer, 2007)



En base a los diferentes tipos de articulaciones, y la combinación entre estas, se puede dar pie a una serie de configuraciones las cuales cumplen con unas determinadas características para tener en cuenta tanto en el diseño y construcción del robot como en su aplicativo.

En cuanto a las ventajas y desventajas de cada una de las configuraciones, estas están directamente relacionadas a su geometría, los robots cartesianos presentan desventaja en cuanto al alcance, donde las configuraciones esféricas y antropomórficas son ideales, en cuanto a la carga de materiales y maquinaria la configuración cartesiana es la más adecuada. En la figura 2 se puede observar las configuraciones más comunes y de mayor aplicación en el campo de la robótica.

Figura 2. Configuraciones más comunes (Barrientos, Peñin, & Balaguer, 2007)



2.2.2. Trasmisiones:

Debido a las inercias generadas por la aceleración de los actuadores, es de vital importancia reducir estos momentos de inercia que afectan el comportamiento del sistema y es aquí donde los transmisores hacen su aporte en la robótica, como elementos que permiten tanto entregar la potencia generada por los actuadores a las articulaciones del robot, como mecanismos que configurados de determinada manera puedan cambiar y convertir movimientos circulares a lineales y viceversa (Barrientos, Peñin, & Balaguer, 2007).

Algunos de los sistemas de transmisión típicos utilizados en los robots industriales son los que se presentan en la Tabla 1, donde se puede observar la entrada al sistema y analógicamente cuál sería su respectiva salida, así como las ventajas y desventajas que presenta cada tipo de transmisión.

Tabla 1. Características de transmisores (Barrientos, Peñin, & Balaguer, 2007)

ENTRADA/SALIDA	DENOMINACION	VENTAJAS	INCONVENIENTES
Circular-Circular	Engranaje	Pares altos	Holguras
	Correa dentada	Distancia grande	-
	Cadena	Distancia grande	Ruido
	Paralelogramo	-	Giro limitado
	Cable	-	Deformabilidad
Circular-Lineal	Tornillo sin fin	Poca holgura	Rozamiento
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento
Lineal-Circular	Paral articulado	-	Control difícil
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento

Vale aclarar que el sistema de transmisión de un robot, independiente de sus características y función, deberá cumplir con una serie de requisitos básicos, como lo son: peso reducido, pero de buen tamaño, deberá tener un buen sistema de engranajes con la finalidad de disminuir todo tipo de juegos u holguras y debe tener una transmisión con gran rendimiento.

2.2.3. Actuadores:

Son los encargados de generar el movimiento que a través de las transmisiones es transportado hacia las articulaciones del robot, estos movimientos son previamente establecidos por un controlador con el fin de posicionar el efector final en las coordenadas deseadas (Zabala, 2010), existen varios tipos de actuadores y

es por ello que han sido clasificados según el tipo de energía que utilizan; en la Tabla 2, se observa la comparación entre los distintos tipos y sus respectivas ventajas y desventajas.

Tabla 2. Características de actuadores (Barrientos, Peñin, & Balaguer, 2007)

	NEUMATICO	HIDRAULICO	ELECTRICO
ENERGIA	Aire a presión	Aceite mineral	Corriente eléctrica
OPCIONES	Cilindros Motor de paletas Motor de pistón	Cilindros Motor de paletas Motor pistón axial	Corriente continua Corriente alterna Motor paso a paso
VENTAJAS	Baratos Rápidos Sencillos Robustos	Rápidos Alta relación par/peso Auto lubricantes Alta capacidad de carga Estabilidad de carga eléctrica	Precisos
			Fiable
			Fácil control
			Silenciosos
DESVENTAJAS	Difícil control Inst. especiales Ruidosos	Difícil mantenimiento Instrumentos especiales Caros	Potencia limitada

Para seleccionar el actuador adecuado hay que tener en cuenta además de la energía que emplea, factores importantes como: potencia, controlabilidad, precisión, velocidad, peso y volumen.

Puntualmente los actuadores eléctricos, debido a sus características de controlabilidad, sencillez y precisión respecto a sus movimientos, se han consolidado como uno de los más usados en el campo de la robótica industrial.

2.2.4. Sensores:

Son de vital importancia para lograr conseguir que el robot realice su trabajo con la precisión, velocidad e inteligencia adecuada pues permiten tener una relación

directa tanto con su estado como con el entorno; estos se clasifican en dos tipos, sensores internos y sensores externos, los cuales pueden ser empleados dependiendo la aplicación y finalidad de robot.

Los sensores internos están divididos en tres tipos; velocidad, posición y presencia. Los sensores de velocidad están diseñados para controlar la velocidad de accionamiento de un actuador, al igual que los sensores de posición, son utilizados como dispositivos de realimentación.

Los sensores de posición proporcionan al sistema la ubicación de las articulaciones del robot en un campo de trabajo previamente delimitado. Los sensores de presencia son los encargados de delimitar los movimientos de las articulaciones y detectan la presencia de un objeto. Entre los sensores externos se encuentran elementos de visión artificial, sensores de velocidad, fuerza, posición, tacto, distancia o telemetría. Ver Tabla 3.

Tabla 3. Tipos de sensores internos (Barrientos, Peñin, & Balaguer, 2007)

PRESENCIA	Inductivo	
	Capacitivo	
	Efecto hall	
	Célula Reed	
	Óptico	
	Ultrasónico	
	Contacto	
POSICION	Analógicos	Potenciómetro
		Resolver
		Sincro
		Inductosyn
		LVDT
	Digitales	Encoders absolutos
		Encoders incrementales
		Regla óptica
VELOCIDAD	Taco-generatriz	

2.2.5. Elemento final:

La actividad final que realiza el robot la determina el elemento final. El efecto final representa la herramienta especial que permite al robot de uso general realizar una tarea particular. Estos son los encargados de interactuar directamente con el entorno.

Los elementos finales se dividen básicamente en dos categorías. Elementos de aprehensión y herramientas. Los elementos de sujeción se utilizan para agarrar objetos, estos se dividen según el tipo de sujeción empleado. Por lo general a estos dispositivos se les denominan pinzas y estas pueden tener elementos adicionales tales como: ventosas, pinzas magnéticas, adhesivas y ganchos. En cuanto a la herramienta, estas pueden ser herramientas para soldadura, ensamble, pintura, entre otras. Esta se determina de acuerdo con la función que realiza el robot

Para el diseño de la garra se integran los siguientes componentes estructura mecánica, actuadores, transmisión, mecanismo de los dedos, sensores y controlador. Los actuadores más utilizados para accionar el mecanismo de los dedos son los cilindros neumáticos y cilindros hidráulicos, los motores paso a paso y los servo-motores. En las transmisiones para el movimiento del mecanismo de los dedos se usan elementos rígidos y flexibles. Los sensores son utilizados cuando se necesita controlar algún tipo de presión. El controlador se encuentra integrado al control central y es encargado de coordinar el cierre y apertura de los dedos (Kelly, 2003).

2.3. DESCRIPCION DE POSICION Y ORIENTACION

En robótica existe la necesidad de poder describir de forma conveniente la posición y orientación que toman los objetos en el espacio, de esta manera se puede lograr determinar específicamente la localización del robot en un sistema de coordenadas definido, permitiendo al robot desempeñar las tareas establecidas.

2.3.1. Descripción de la posición:

Después de tener un sistema de coordenadas se puede establecer la ubicación de un punto en cualquier parte del espacio mediante un vector de posición 3×1 , como indica la ecuación 1; sabiendo que es muy común tener un gran número de vectores definidos en el espacio es de vital importancia etiquetar estos con información que facilite identificar a que sistema o a que parte de este pertenece (Olier Carroso, Avilés, & Hernandez Bello, 1999).

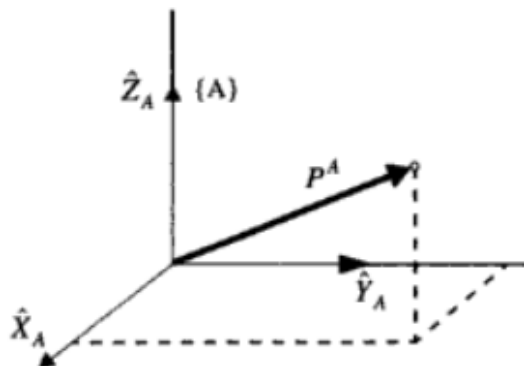
$$P^A = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.3.2. Descripción de la orientación:

Se podría decir que un punto queda totalmente definido en el espacio a través de los datos de su posición, pero cuando se trata de un sólido es fundamental poder establecer cuál es su orientación con respecto al sistema referencia. Esta orientación en el espacio viene definida por 3 GDL o tres componentes linealmente independientes; de manera general la relación estará dada por la posición y orientación del sistema asociado, respecto al de referencia como se observa en la Figura 3.

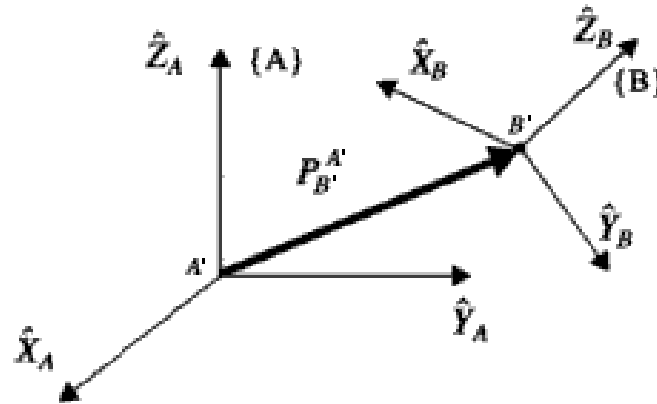
Para el análisis de la posición y orientación del robot, este es representado como un cuerpo sólido; de tal manera que se puede establecer un sistema de referencia mediante ejes ortogonales.

Figura 3. Representación de la posición en el espacio (Aparicio Gonzalez & Orjuela Parra, 2005)



Al tener asociado un objeto al sistema de referencia B, el vector P_B^A , representa la posición de origen del sistema B con respecto A, como podemos ver en la Figura 4.

Figura 4. Posición y orientación en el espacio (Aparicio Gonzalez & Orjuela Parra, 2005)



Para la representación espacial de un cuerpo, existen tres métodos fundamentales mediante los cuales podemos establecer su posición y orientación, los cuales son:

- Coordenadas cartesianas, representadas por el siguiente vector

$$P_B^A(x, y, z)$$

- Coordenadas cilíndricas, representadas por el siguiente vector

$$P_B^A(r, \theta, z)$$

- Coordenadas esféricas, representadas por el siguiente vector

$$P_B^A(\rho, \theta, \phi)$$

2.3.3. Matrices de rotación

Las matrices de rotación son la metodología más utilizada para realizar la descripción de la orientación. Esta se define como una matriz de transformación que opera sobre un vector de posición en un espacio tridimensional que se encuentra en un sistema de referencia rotado $ouvw$, a un sistema de coordenadas de referencia $oxyz$. Un vector que se encuentra en el plano se puede representar de la siguiente forma:

$$P_{xyz} = [p_x, p_y, p_z]^T = p_x \cdot i_x + p_y \cdot j_y + p_z \cdot k_z \quad (2)$$

$$P_{uvw} = [p_u, p_v, p_w]^T = p_u \cdot i_u + p_v \cdot j_v + p_w \cdot k_w$$

Realizando una serie de transformaciones, se obtiene:

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} p_u \\ p_v \\ p_w \end{bmatrix} \quad (3)$$

Luego;

$$R = \begin{bmatrix} i_x i_u & i_x j_v & i_x k_w \\ j_y i_u & j_y j_v & j_y k_w \\ k_z i_u & k_z j_v & k_z k_w \end{bmatrix} \quad (4)$$

R es la matriz de rotación que define la orientación del sistema *ouvw* con respecto al sistema *oxyz*, esta matriz es ortogonal y por lo tanto la inversa de R^{-1} es igual a la traspuesta $R^T \therefore R^{-1} = R^T$.

Con esta matriz se realiza la representación de la orientación de sistemas girados únicamente sobre uno de sus ejes principales, de acuerdo con esto se obtiene las siguientes matrices que representan las rotaciones sobre los ejes *xyz*.

$$R(x, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$R(y, \alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$R(z, \alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.3.4. Coordenadas y matrices homogéneas

Para poder localizar un objeto en el espacio, es decir posición y orientación conjuntamente, se utilizan las matrices homogéneas las cuales permiten tener en

una sola matriz la posición y la orientación de un objeto respecto a un sistema de referencia.

La matriz de transformación homogénea es 4x4 (ver ecuación 8); esta, se encarga de transformar un vector de posición expresado en coordenadas homogéneas desde un sistema de coordenadas hasta otro sistema de coordenadas. Dicha matriz está compuesta por 4 submatrices de distinto tamaño, entre las que se encuentra una submatriz $R_{3 \times 3}$ que representa la rotación, una submatriz $P_{3 \times 1}$ que corresponde al vector de translación, una submatriz $f_{1 \times 3}$ que representa una transformación de perspectiva y una submatriz $W_{1 \times 1}$ que representa un escalar.

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & W_{1 \times 1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Para la configuración cartesiana solo se realizan movimientos traslacionales, la representación en coordenadas homogéneas se muestra en la ecuación 9.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Ahora, si se desea conocer las componentes de un vector r_{uvw} trasladado se obtiene de la siguiente forma.

$$\begin{bmatrix} r_u \\ r_v \\ r_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_u \\ r_v \\ r_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.4. CINEMATICA

La cinemática es la encargada de estudiar y analizar los movimientos que pueda tener un cuerpo en el espacio, dejando de lado y sin considerar las fuerzas que puedan ocasionarlo. En la cinemática de un brazo articulado o robot, aplica la geometría para realizar el estudio del movimiento de una cadena de eslabones que lo componen, tomando estos como cuerpos rígidos. Existen varias maneras de determinar la posición de un robot, para esto, la cinemática posee dos enfoques, el primero la cinemática directa, la cual consiste en determinar la posición del efector final a partir de las posiciones de cada uno de los eslabones que componen la cadena, por otra parte, la cinemática inversa la cual permite determinar el estado de cada una de las articulaciones a partir de la posición y orientación del efector final deseadas.

2.4.1. Cinemática Directa

La cinemática directa es la relación que se tiene entre cada una de las posiciones de los eslabones que componen el robot, respecto a la posición y orientación del efector final, las variables que se encuentran en las articulaciones son los ángulos formados entre los eslabones para el caso de una articulación rotacional y longitud si se hablara de una articulación traslacional. Entre los métodos más comunes para la solución del problema se encuentra el uso de matrices homogéneas, usando el método de Denavit-Hartenberg, permitiendo obtener como resultado la posición final del manipulador como la de cada uno de sus eslabones. (Ramirez & Rubiano, 2012)

Estos parámetros se definen del siguiente algoritmo:

D-H 1. Numerar los eslabones comenzado con 1 (primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con n (último eslabón móvil). Se enumera como eslabón 0 a la base fija del robot.

D-H 2. Numerar cada articulación comenzado por 1 (la correspondiente al primer grado de libertad) y acabando en n.

D-H 3. Localizar el eje de cada articulación. Si esta es rotativa, el eje será su propio eje de giro. Si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.

D-H 4. Para i de 0 a n-1 situar el eje z_i sobre el eje de la articulación i+1.

D-H 5. Situar el origen del sistema de la base $\{S_0\}$ en cualquier punto del eje z_0 . Los ejes x_0 y y_0 se situarán de modo que formen un sistema dextrógiro con z_0 .

- D-H 6.** Para i de 1 a $n-1$, situar el sistema $\{S_i\}$ (solidario al eslabón i) en la intersección del eje z_i con la línea normal común a z_{i-1} y z_i .
- D-H 7.** Situar x_i en la línea normal común a z_{i-1} y z_i .
- D-H 8.** Situar y_i de modo que forme un sistema dextrógiro con x_i y z_i .
- D-H 9.** Situar el sistema $\{S_n\}$ en el extremo del robot de modo que z_n coincida con la dirección de z_{n-1} y x_n sea normal a z_{n-1} y z_n .
- D-H 10.** Obtener θ_i , como el ángulo que hay que girar en torno a z_{i-1} para que x_{i-1} y x_i queden paralelos.
- D-H 11.** Obtener d_i como la distancia medida a lo largo de z_{i-1} , que habría que desplazar $\{S_{i-1}\}$ para que x_i y x_{i-1} queden alineados.
- D-H 12.** Obtener a_i como la distancia medida a lo largo de x_i (que ahora coincidirá con x_{i-1}) que habría que desplazar el nuevo $\{S_{i-1}\}$ para que su origen coincidiese con $\{S_i\}$.
- D-H 13.** Obtener α_i como el ángulo que habría que girar entorno x_i (que ahora coincidirá con x_{i-1}) para que el nuevo $\{S_{i-1}\}$ coincidiese totalmente con $\{S_i\}$.
- D-H 14.** Obtener las matrices de transformación A_i^{i-1} planteada en la ecuación (9).
- D-H 15.** Obtener las matrices de transformación que relacionan el sistema de la base con el del extremo del robot $T = A_1^0, A_2^1, \dots, A_n^{n-1}$.
- D-H 16.** La matriz T define la orientación (submatriz de rotación) y posición (submatriz de traslación) del extremo referido a la base en función de las n coordenadas articulares.

2.4.2. Cinemática Inversa

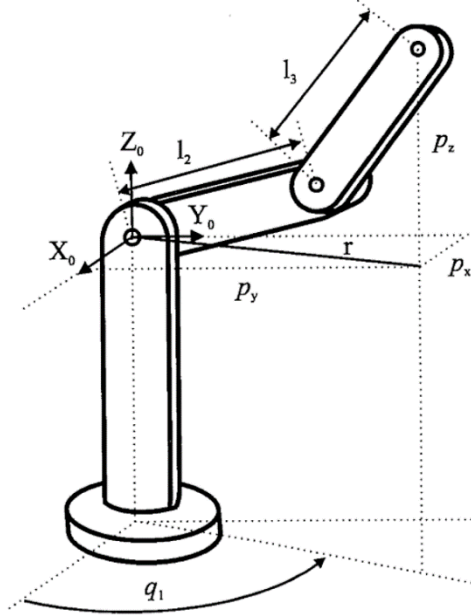
El problema de la cinemática inversa consiste en poder encontrar los valores que deben tomar cada una de las articulaciones del robot, para que el extremo del eslabón final se posicione en un determinado punto en el espacio. Para este caso se calculan los valores de $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ basado en el punto P_x, P_y, P_z .

El método geométrico es la forma más habitual para afrontar el problema de la cinemática inversa, el cual permite los valores de las primeras variables articulares, que son las que consiguen posicionar el robot, para ello se usa relaciones geométricas y trigonométricas sobre cada uno de los elementos del robot.

Este proceso es adecuado para robots de pocos grados de libertad, donde su función radica principalmente en posicionar el extremo de su eslabón final. En la Figura 5 se puede observar un robot con 3 GDL, para analizar su respectiva solución (Barrientos, Peñin, & Balaguer, 2007). Debido a su estructura planar, se

puede determinar que el valor del ángulo q_1 , se obtiene de la relación de P_y y P_x , como lo muestra la ecuación 11.

Figura 5. Robot articular de 3 GDL



$$q_1 = \tan^{-1} \left(\frac{P_y}{P_x} \right) \quad (11)$$

Aplicando el teorema del coseno en los elementos 2 y 3, del articulado obtenemos la siguiente relación, para el ángulo q_3

$$\cos q_3 = \frac{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} \quad (12)$$

Por motivos de ventajas computacionales es conveniente usar de la \tan^{-1} en lugar del \cos^{-1} , puesto que

$$\sin q_3 = \frac{+}{-} \sqrt{1 - \cos q_3^2} \quad (13)$$

Se tendrá que

$$q_3 = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{+}{-} \sqrt{1 - \cos q_3^2}}{\cos q_3} \right); \cos q_3 = \frac{P_X^2 + P_Y^2 + P_Z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} \quad (14)$$

Al observar la ecuación correspondiente al resultado de q_3 , se observa que tiene dos soluciones, una de signo positivo y otro negativo. Estas corresponden a la configuración de codo arriba (ver Figura 6) y codo abajo (ver Figura 7) del robot.

Figura 6. Codo arriba

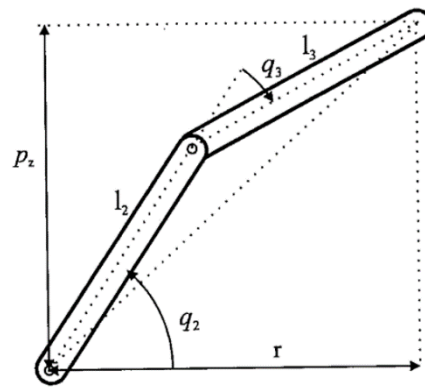
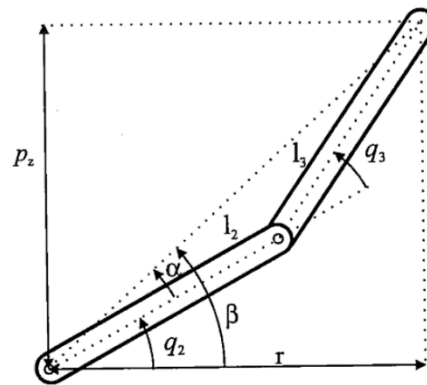


Figura 7. Codo abajo



Para calcular la variable restante q_2 , se parte de la diferencia entre β y α

$$q_2 = \beta - \alpha \quad (15)$$

Donde

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{P_z}{r}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{P_z}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}}\right) \quad (16)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{l_3 \sin q_3}{l_2 + l_3 \cos q_3}\right) \quad (17)$$

Siendo la respuesta de esta diferencia la solución al problema cinemático inverso.

2.5. SISTEMAS DE CONTROL

2.5.1. Estructura del control PID

Si se considera un lazo de control de una entrada y una salida (SISO), para un grado de libertad:

Los controladores PID, están conformados por tres acciones las cuales son, la acción proporcional (P), la integral (I) y la derivativa (D), y estos pueden ser trabajados en simultaneo buscando minimizar errores y tiempo de respuesta de las plantas; estos controladores son denominados P, PI, PD y PID.

2.5.1.1. Control proporcional (P)

Proporciona una salida del controlador que es proporcional al error, es decir $u(t) = K_p \cdot e(t)$, que vista desde su función de transferencia se expresa de la manera:

$$C_p(s) = K_p$$

Donde K_p es una ganancia proporcional ajustable. Este es un controlador que puede ser aplicado a cualquier planta estable, pero su simplicidad genera un desempeño limitado y error en régimen permanente (offset).

2.5.1.2. Control proporcional-integral (PI)

Está definido mediante la ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Donde T_i se denomina el tiempo integral y es el que ajusta la acción integral; de su función de transferencia resulta la siguiente ecuación:

$$C_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

A diferencia de un control proporcional, para el cual es necesario tener un error para tener una acción de control distinta a cero, con la acción integral un error pequeño de magnitud positiva siempre entrega una acción de control creciente y si es negativa la señal de control tendería a ser decreciente. Este razonamiento no permite evidenciar que error en régimen permanente será siempre cero.

2.5.1.3. Control proporcional-derivativo (PD)

Se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Donde T_d es una constante llamada tiempo derivativo, esta acción tiene carácter de previsión, lo que permite que la acción de control sea mucho más rápida, pero su desventaja radica en que amplifica las señales de ruido pudiendo generar esto una saturación en el actuador además no es recomendable usarse sola pues solo es eficaz durante periodos transitorios (Mazzone, 2002). La función de transferencia del controlador PD, se define como:

$$C_{PD}(s) = K_p + sK_pT_d$$

2.5.1.4. Control proporcional-integral-derivativo (PID)

Este tipo de control combinado reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales y está definido por la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Y su función de transferencia resultante es:

$$C_{PID} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

CAPÍTULO 3

ANALISIS CINEMATICO DEL MANIPULADOR

Para el análisis cinemático del manipulador se utiliza una metodología donde se define un sistema de coordenadas denominado base, junto con otros sistemas de coordenadas locales situados en cada uno de los eslabones móviles del manipulador. La unión de estos sistemas genera un marco de referencia con respecto al cual se realizan las mediciones físicas que determinan la posición del elemento terminal del manipulador, encargado de realizar la tarea para la cual fue diseñado.

El problema cinemático se divide en un análisis directo e inverso. A continuación, se presentan las condiciones de análisis para la solución de estos sistemas.

3.1. CINEMÁTICA DIRECTA DEL MANIPULADOR DE 3GDL

Para la solución del problema cinemático directo se hace uso de las matrices de transformación homogéneas, usando el método de la representación sistemática de Denavit-Hartenberg, pues permite conocer tanto la posición final de manipulador como la posición de cada una de sus articulaciones.

Esta representación se remplace en la matriz de transformación H_i^{i-1} la cual es un arreglo 4x4, que contiene información relativa a la posición y orientación del sistema de referencia unido al i-ésimo enlace del manipulador en relación con el sistema de referencia de la conexión i-1, de esta manera, la matriz H_1^0 representa la posición y orientación del sistema de coordenadas S_1 del robot con respecto al sistema de coordenadas S_0 , si S_0 se coloca en el eje del manipulador y S_1 al final de un eslabón, la matriz H_1^0 representa la posición de S_1 referenciada al sistema de coordenadas fijo del robot. En este caso la matriz H_n^0 donde n representa los grados de libertad, es aquella que representa la posición final del robot con respecto al sistema de referencia.

$$T = H_n^0 = H_1^0 H_2^1 H_3^2 \dots H_n^{n-1} \quad (18)$$

Para el cálculo de H_i^{i-1} se debe definir los parámetros de Denavit-Hartenberg, basados exclusivamente en las características geométricas de cada enlace y los sistemas de coordenadas en cada uno, ver Figura 8. Las características son:

a_i = Distancia que se trasladan los ejes X medida entre ejes Z

d_i = Distancia que se traslada los ejes Z medida entre ejes X

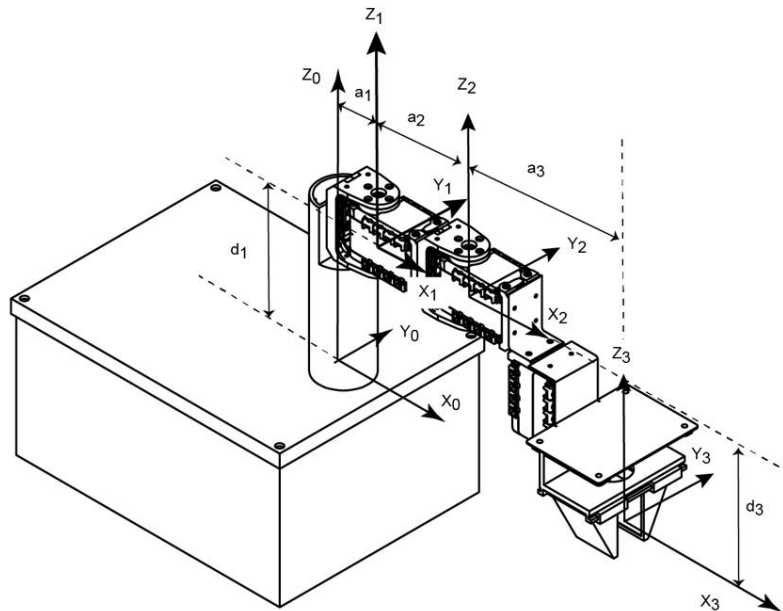
θ_i = Ángulo de giro del eje X medido alrededor del eje Z

α_i = Ángulo de giro del eje Z medido alrededor del eje X_{i+1}

Tabla 4. Parámetro de Denavit-Hartenberg

Eslabón	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	0	26,5	104,875	θ_1
2	0	68	0	θ_2
3	0	107,593	95,115	0

Figura 8. Localización de ejes coordenados



Se parte de la forma general de la matriz de rotación, la cual es:

$$H_0^1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\cos\alpha_1 \sin\theta_1 & -\sin\alpha_1 \sin\theta_1 & a_1 \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & \cos\alpha_1 \cos\theta_1 & -\sin\alpha_1 \cos\theta_1 & a_1 \sin\theta_1 \\ 0 & -\sin\alpha_1 & \cos\alpha_1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Remplazando los valores de la tabla 8, se obtiene:

$$H_1^0 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 26,5 * \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 26,5 * \sin\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 104,875 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$H_2^1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 68 * \cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 68 * \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$H_3^2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & 107,593 * \cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 107,593 * \sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 95,115 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Remplazando en la ecuación (18), se obtiene:

$$T = \begin{bmatrix} n & o & a & P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Donde los vectores n , o y a , representan la orientación del punto final del robot y el vector P representa el valor de las coordenadas x , y , z en función de los ángulos θ .

$$P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad (24)$$

Las coordenadas del extremo del último eslabón respecto a la base del motor esta dado por:

$$P_x = 26,5\cos\theta_1 - 95,115\sin\theta_1 + 68\cos\theta_1\cos\theta_2 + 107,593\cos\theta_1\sin\theta_2\sin\theta_3 - 107,593\cos\theta_1\sin\theta_2\sin\theta_3 \quad (25)$$

$$P_y = 26,5\sin\theta_1 + 95,115\cos\theta_1 + 68\cos\theta_2\sin\theta_2 + 107,593\cos\theta_2\cos\theta_3\sin\theta_1 - 107,593\sin\theta_1\sin\theta_2\sin\theta_3 \quad (26)$$

$$P_z = 104,875 - 68\sin\theta_2 - 107,593\cos\theta_2\sin\theta_3 - 107,593\cos\theta_3\sin\theta_2 \quad (27)$$

Para la implementación de ecuación cinemática, se hace uso del Software Simulink, en el cual mediante una sucesión de diagrama de bloques se logra representar el método sistemático de Denavit-Hartenberg, como se observa en la figura 9.

Figura 9. Bloque Simulink de la cinemática directa



Dentro del bloque anterior se encuentra el sistema al que ingresaran los ángulos provenientes de los actuadores, los procesara y por último suministrará la posición cartesiana del extremo del último eslabón dentro de los límites de área de trabajo, como se observa en la figura 10 y 11.

Figura 10. Sub-bloque cinemática directa

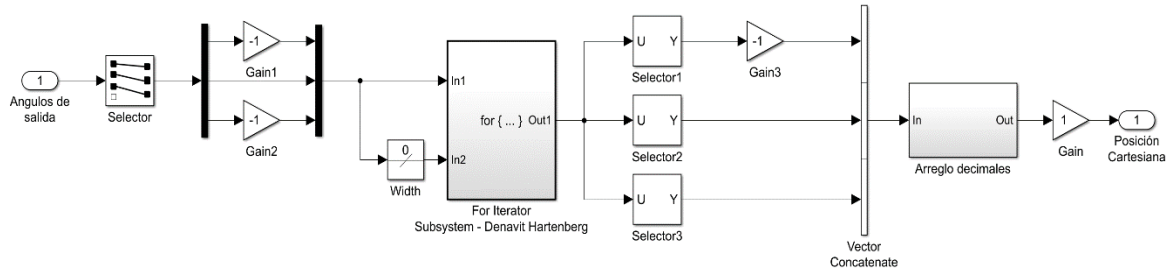
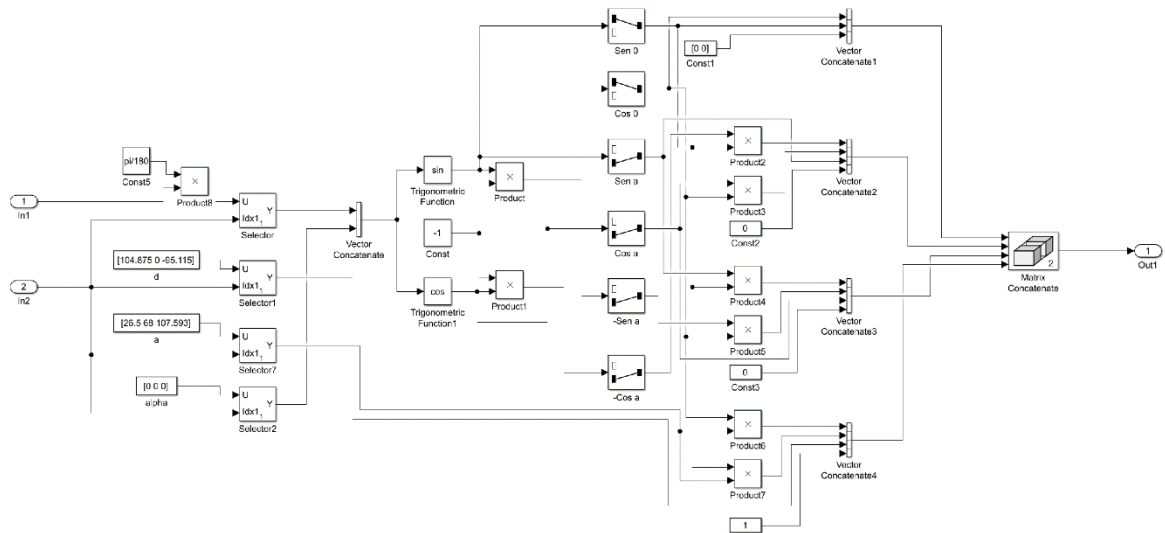


Figura 11. Solución cinemática directa, Denavit-Hartenberg



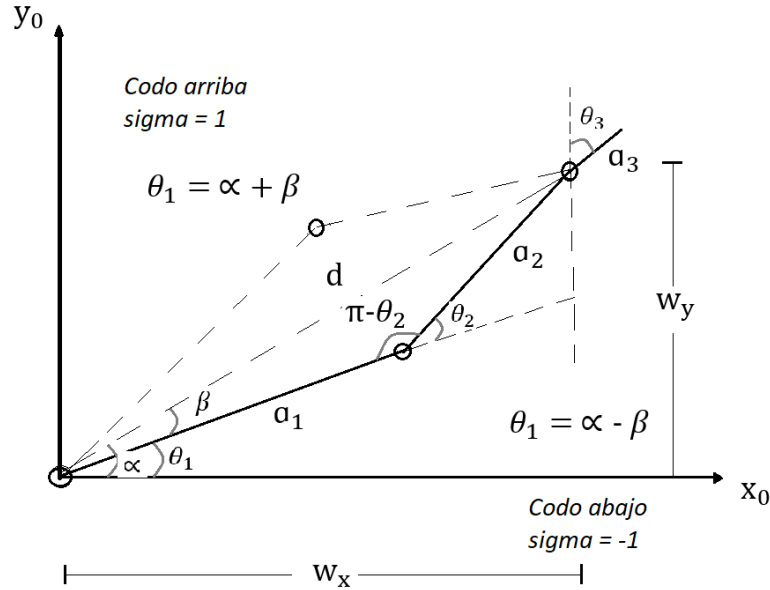
3.2. CINEMÁTICA INVERSA DEL MANIPULADOR DE 3 GDL

Para el cálculo de la cinemática inversa es necesario conocer la posición a la que se desea llegar y la orientación del elemento terminal (eslabón final), respecto al sistema de referencia ubicado en la base del manipulador. Una vez se tiene la posición y la orientación, la tarea consiste en hallar los valores angulares para cada una de las articulaciones del manipulador robótico, representadas por la variable θ_i , que fueron halladas en la tabla 8, donde se especifican los parámetros de Denavit-Hartenberg para el manipulador de 3GDL.

Para este trabajo se emplea el método geométrico y es aplicado al manipulador (ver figura 12) debido a que utiliza una menor cantidad de variables y de cálculos

simples haciendo que computacionalmente sea más eficiente que otros métodos disponibles. Para el caso se calculan los valores de $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, basados en los puntos P_x, P_y, P_z , correspondientes al punto que se desea alcanzar.

Figura 12. Elementos 1, 2 y 3 del robot de la figura 8



En las expresiones matemáticas en las cuales se obtienen valores numéricos indeterminados para ciertas condiciones particulares, se debe realizar un análisis de las causas, las cuales pueden tener origen en la geometría misma del manipulador o en las expresiones algebraicas obtenidas. Los valores indeterminados obtenidos por la geometría del manipulador para algunos puntos del espacio, se debe a que dichos valores no pueden ser alcanzados por ninguna configuración de sus vínculos (eslabones); las restricciones causadas por la geometría particular del manipulador reciben el nombre de singularidades y pueden ser eliminadas al seleccionar un rango apropiado de operación para cada articulación y delimitar el espacio de trabajo alcanzable por el conjunto de articulaciones.

En la Figura 12 se observó el robot de forma planar, quedando este plano definido por el ángulo de la primera variable articular θ_1 y el cateto opuesto y adyacente (w_x, w_y) a la hipotenusa formada por la distancia d , desde el origen hasta la tercera articulación, donde p_x y p_y son la posición dada.

$$w_x = p_x - a_3 * \cos \varphi; \quad \rightarrow \quad \varphi = \text{orientacion} \quad (28)$$

$$w_y = p_y - a_3 * \sin \varphi \quad (29)$$

$$d = \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \quad (30)$$

Mediante estos valores y en función de la gráfica de la Figura 12, se llega a la solución para cada ángulo formado por las juntas, donde:

$$\alpha = \text{atan2}\left(\frac{w_y}{w_x}\right); \quad \beta = \text{acos}\left(\frac{d^2 + a_1^2 - a_2^2}{2 * a_1 * d}\right) \quad (31)$$

$$\theta_1 = \alpha \pm \beta; \quad \text{siempre y cuando} \quad d \leq (a_1 + a_2) \quad (32)$$

Finalmente, remplazando la ecuación (30), se obtiene:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \text{atan2}\left(\frac{p_y - a_3 * \sin \varphi}{p_x - a_3 * \cos \varphi}\right) + \sigma \\ &* \left(\text{acos}\left(\frac{(p_x - a_3 * \cos \varphi)^2 + (p_y - a_3 * \sin \varphi)^2 + a_1^2 - a_2^2}{2 * a_1 * \sqrt{(p_x - a_3 * \cos \varphi)^2 + (p_y - a_3 * \sin \varphi)^2}}\right) \right) \end{aligned} \quad (33)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}\left(\frac{(p_y - a_3 * \sin \varphi) - a_1 * \sin \theta_1}{(p_x - a_3 * \cos \varphi) - a_1 * \cos \theta_1}\right) - \theta_1 \quad (34)$$

$$\theta_3 = \varphi - \theta_1 - \theta_2 \quad (35)$$

Mediante la solución matemática de las ecuaciones 32, 33 y 34, puede obtenerse los ángulos para cada una de los actuadores o articulaciones del manipulador.

Su representación en el software Simulink se da según las siguientes figuras 13 y 14.

Figura 13. Bloque de la cinemática inversa

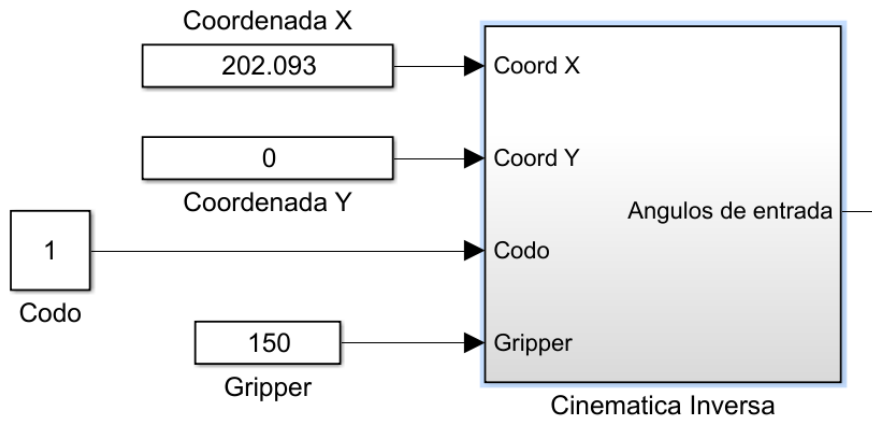
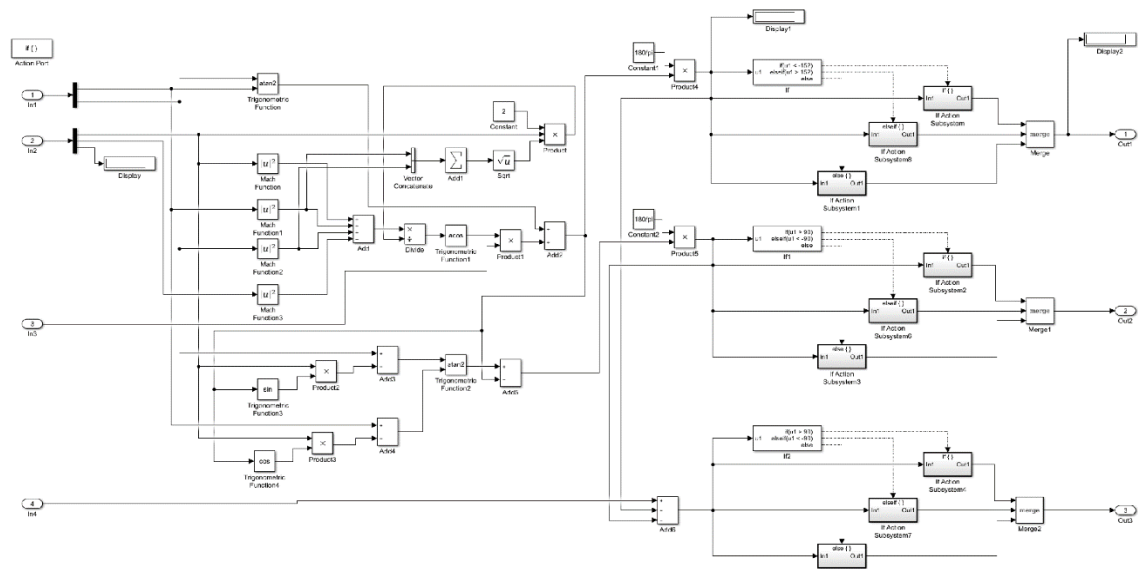


Figura 14. Solución geométrica cinemática inversa



CAPÍTULO 4

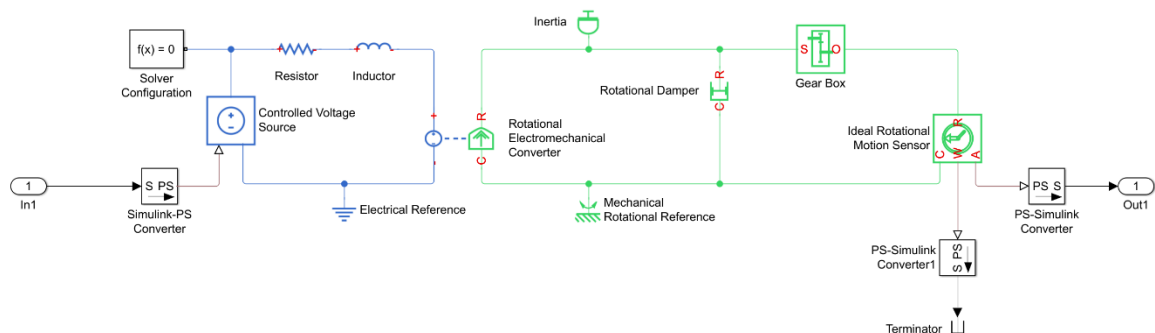
CONTROL DE POSICIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS ACTUADORES DEL MANIPULADOR

4.1. ESTRATEGIA DE CONTROL

Con el fin de alcanzar diferentes puntos en el espacio de trabajo del manipulador basado en la posición y orientación del elemento final sin tener en cuenta las características dinámicas del manipulador, se propone un control multivariable descentralizado, ya que la interacción entre las variables de entrada del manipulador no es fuerte y por lo tanto se pueden despreciar, permitiendo controlar independiente cada variable de entrada (articulación) como si se tratara de un sistema SISO. Por otra parte, la instrumentación necesaria para llevar a cabo un control dinámico requiere de sensores que permitan la medición de diferentes valores como velocidad y aceleración de los centros de gravedad de cada eslabón, así como un sistema de cómputo especializado que optimice los tiempos de cálculo para la implementación del control en tiempo real y disminuya los tiempos de comunicación con los actuadores del manipulador. Involucrar esta parte dinámica demanda una mayor cantidad de instrumentos e inversión económica excediendo lo presupuestado para el proyecto.

Los servomotores de la familia Dynamixel, traen implícito un sistema de control PID, para garantizar una mayor precisión en su posicionamiento, por lo que se opta por diseñar una planta con las características exactas de estos motores y simular su funcionamiento en Simulink (ver figura 15). El Datasheet de los motores internos de cada servo se encuentra en el anexo 1.

Figura 15. Modelo servomotor Simulink

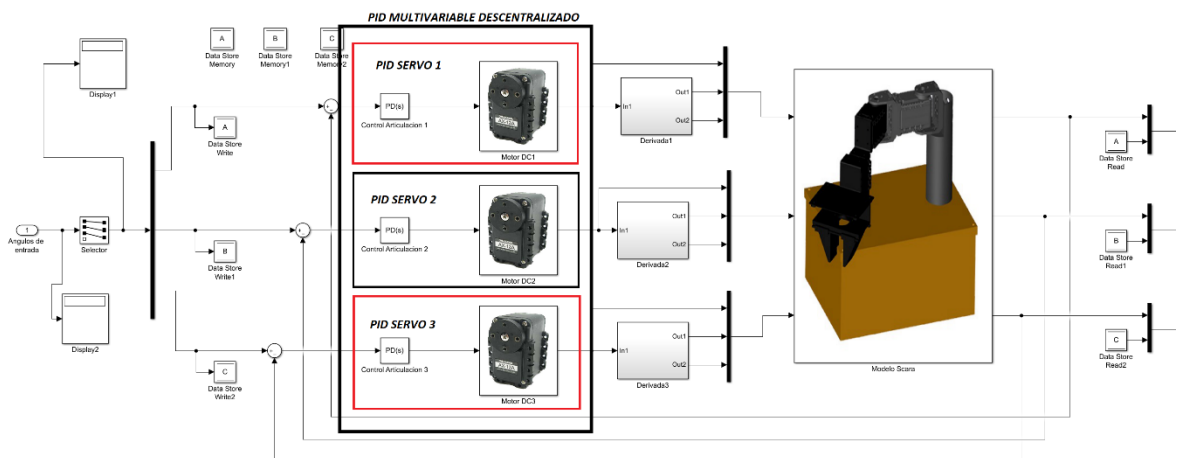


En la figura 16, se observa todo el sistema de control del manipulador, el cual fue aplicado de manera descentralizada para cada uno de los servomotores, que posteriormente son concatenados obteniendo como resultado un control multivariable descentralizado.

4.2. SIMULACIÓN Y SINTONIZACIÓN CONTROL MEDIANTE SIMULINK

Para simular el control multivariable descentralizado; haciendo uso de Simulink, se opta por usar tres bloques PID Controller conectados cada uno a las articulaciones del robot tipo SCARA, representadas por el modelo ideal de motor presente en la figura 21.

Figura 16. Sistema de control PID multivariable



Cada bloque conectado a los servomotores posee una serie de variables que pueden ser manipuladas para establecer un control ideal que vaya en pro de las necesidades establecidas, lo cual para el caso se define con anterioridad que el tipo de control fuera de tiempo continuo, las ganancias de control, es decir, la constante proporcional (P), derivativa (D) y el correspondiente filtro derivativo (N), son asignados después de sintonizar el controlador mediante la opción TUNE, como se observa en la figura 17.

Figura 17. Sintonizador de control

Time domain:
☒ Continuous-time
☐ Discrete-time

Main PID Advanced Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: internal [Compensator formula](#)

Proportional (P): 6.98073252014547

Derivative (D): 0.0993506565122345

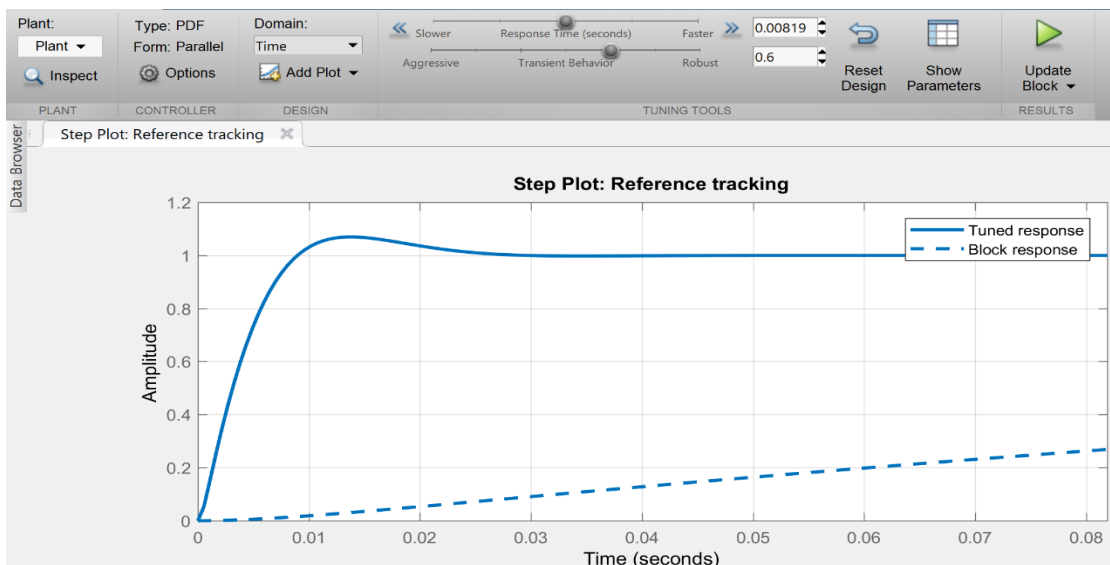
Filter coefficient (N): 4.24145994956461

Tune...

$$P + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

La opción TUNE abre el cuadro de diálogo con el que se puede sintonizar las ganancias del controlador de forma interactiva de acuerdo con los requerimientos de control establecidos por el diseñador (tiempo de establecimiento y máximo sobre impulso) mediante el aplicativo PID Tuner. En pocas palabras, el aplicativo inicialmente linealiza la planta y diseña para esta un sistema de control inicial de referencia y da a conocer su respuesta en lazo cerrado representado por la línea azul punteada, por otra parte, y a modo de comparación, incluye la repuesta en lazo cerrado para las ganancias especificadas por en el bloque PID Controller representada por la línea azul continua. Ver figura 18.

Figura 18. Respuesta inicial del sistema



Una vez el aplicativo linealiza y diseña el control de referencia, se procederá en adaptar el diseño de control con los requerimientos mencionados anteriormente, buscando un tiempo de respuesta prudente y que no se genere ningún sobrepaso en el modelo, para hacer así el movimiento del robot SCARA lo más natural posible. Esto se logra con los variadores (Response time & Transient Behavior) que se encuentran en el panel superior, correspondientes al tiempo de respuesta y el comportamiento transitorio, los cuales a medida que son modificados van actualizando la respuesta del sistema.

Luego de varias pruebas se logra una sintonización perfecta (ver figura 19), con un tiempo de respuesta de 0,5seg y un comportamiento transitorio robusto que garantiza un sobrepaso nulo con un control PD. Automáticamente se establecen estos valores, el software permite conocer las constantes P, D y N, con las que trabajará cada articulación, como se observa en la figura 20.

Figura 19. Respuesta del sistema para los parámetros establecidos

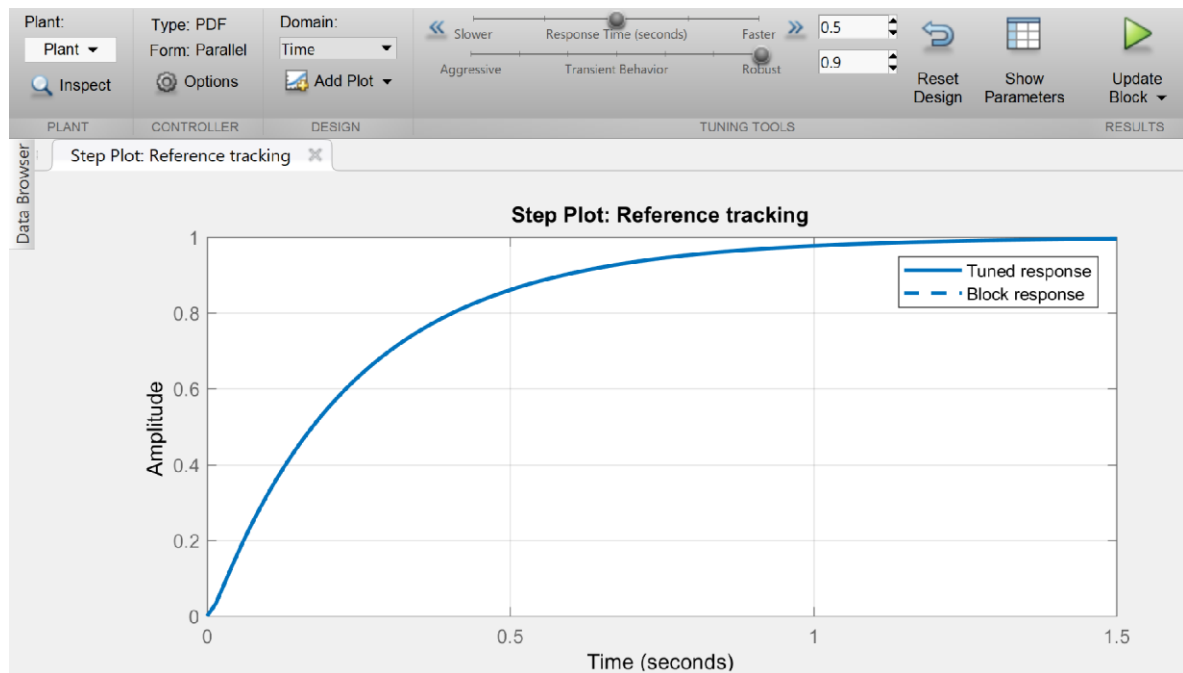


Figura 20. Constantes de control y parámetros del sistema

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	686.0446	686.0446
I	n/a	n/a
D	32.1018	32.1018
N	279094.7455	279094.7455
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	0.000998 seconds	0.000998 seconds
Settling time	NaN seconds	NaN seconds
Overshoot	0 %	0 %
Peak	0.965	0.965
Gain margin	42.5 dB @ 1.13e+05 r...	42.5 dB @ 1.13e+05 r...
Phase margin	89.1 deg @ 2.44e+03 ...	89.1 deg @ 2.44e+03 ...
Closed-loop stability	Stable	Stable

4.3. ACTUADORES USADOS EN EL MANIPULADOR

Para el accionamiento del manipulador se utilizaron los actuadores Dynamixel, esto debido a que pueden ser fácilmente programados por el usuario y cuentan con retroalimentación. Dentro de sus características más relevantes se encuentra el protocolo de comunicación serial, a través de un paquete de datos que puede llegar hasta 1Gbits/s; donde en cada paquete puede enviar y censar información como velocidad, posición, entre otras. Otra de sus características principales radica en que da la posibilidad de cambiar las variables del controlador PID para uno o varios de los actuadores, esto se logra enviando cadenas completas de datos, donde cada una de estas cadenas lleva información de cada servomotor por separado pues estos cuentan con un ID único, configurado previamente por el usuario; debido a esta característica y tipo de comunicación solo se hace necesario un cable de datos y dos de alimentación conectados mediante una tipología tipo BUS, iniciado por el primer servo hasta los n servos que se tengan conectados. Ver figuras 21 y 22.

Figura 21. Asignación de pines (Robotis, 2006)

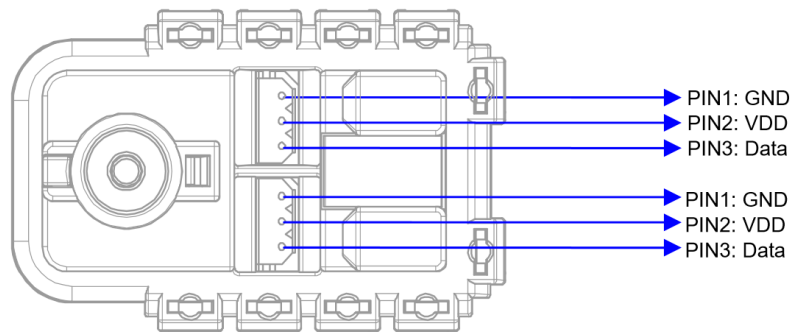
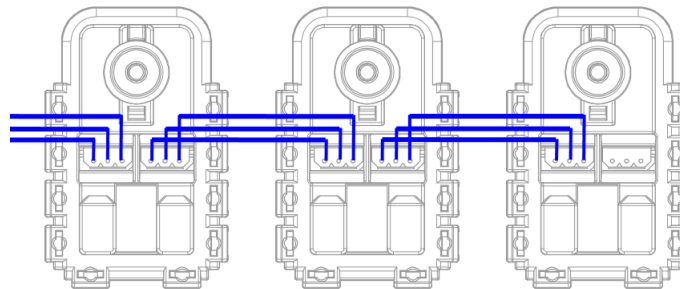


Figura 22. Conexión serial servomotores Dynamixel (Robotis, 2006)



Este tipo de actuadores cuentan con una tabla de registros en la cual se almacenan los datos leídos por cada uno de los motores, y a la cual cada vez que se desee modificar o leer una posición o cualquiera de las diferentes variables que permite censar el servomotor se deberá acceder directamente a la tabla de registros. Estos motores pueden ser conectados de manera serial formando una red de motores de la cual podemos indexar o sustraer información de cualquier motor en particular en cualquier instante de tiempo debido a que como se mencionó anteriormente estos traen asignados un ID exclusivo que permitirá la identificar los servos en todo momento; esta forma de interconexión permite tener una red de hasta 255 motores en línea conectados a un único puerto del ordenador y con un único cable de datos.

4.3.1. Estructura de comunicación con los actuadores

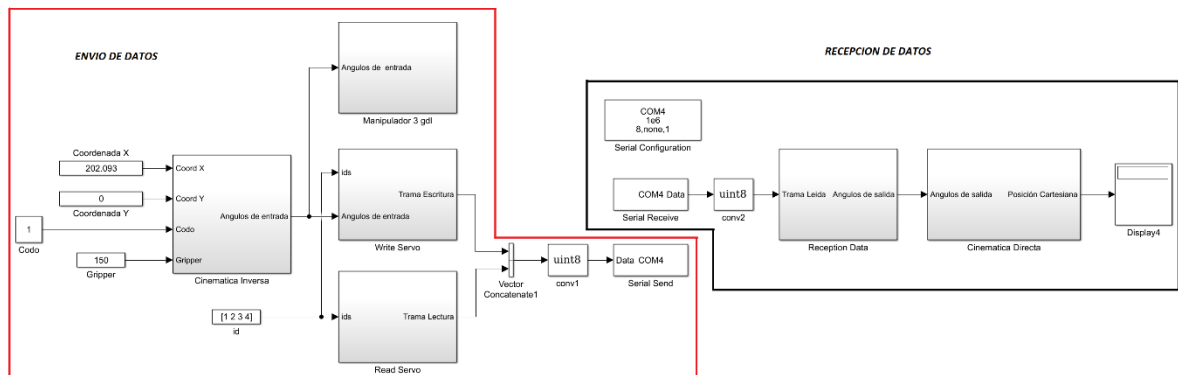
Esta familia de actuadores se comunica mediante una tabla de registros contenida en su EP-ROM, que contiene la información necesaria para la variación de los diferentes parámetros de control, por lo que los parámetros que el usuario puede variar momentáneamente son almacenados en la memoria RAM. Los datos serán enviados al actuador mediante un hardware de comunicación el cual emplea comunicación serial asíncrona de 8 bits, 1 bit de parada y sin paridad los cuales deben ser escritos siguiendo la secuencia mostrada en la tabla 5.

Tabla 5. Estructura de control para la comunicación con los servomotores

OFF	OFF	ID	Long. Paquete	Inst. 1	Inst. 2	Parámetro	Check sum
Inicio paquete de datos		Identificador del servomotor de 0 a 255	Longitud de la cadena n+2 (Numero de parámetros que le preceden)	Parámetro asignado para lectura (2), escritura (3)	Parámetro que se va a manipular, velocidad, posición, torque, etc.	Valor por el cual se va a sustituir el parámetro modificado en la Inst. 2	Parámetro que indica el número de datos que se van a enviar en la trama

Se puede observar en la figura 23, toda la estructura de comunicación para controlar y verificar el estado de los servomotores, diseñada desde Simulink, en la cual se encuentra el bloque correspondiente al envío y recepción de datos.

Figura 23. Sistema de comunicación para la lectura y escritura de datos en los servomotores



Este diagrama se encuentra dividido en dos subsistemas cada uno de ellos correspondientes al envío de datos desde el programa hacia el manipulador y el otro encargado de la recepción de datos enviados posteriormente por los servomotores, con la información censada correspondiente a las instrucciones predefinidas.

4.3.2. Rango de movimiento de los actuadores

Los actuadores Dynamixel, tienen diferentes rangos de movimientos, los cuales varían en función de su referencia. Los actuadores de la serie AX y RX oscilan entre 0 a 300°, con una resolución de 0,29° y de 0 a 360°, con una resolución de 0,088° para la serie MX. Las características de control adicionales para la familia AX se presentan el anexo 2.

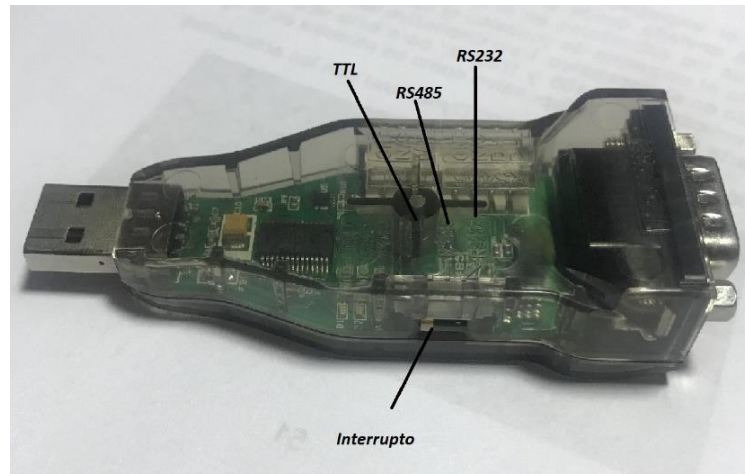
4.3.3. Dispositivo de comunicación USB2Dynamixel

Este dispositivo USB es el encargado de procesar y enviar las tramas de comunicación (binarias), desde el puerto USB del ordenador haciendo uso del software MatLAB, hacia los actuadores en un formato de comunicación TTL. En la figura 24 se observa el esquema de conexión entre la USB, los servomotores y la fuente de alimentación. Vale aclarar que este dispositivo también permite trabajar mediante el protocolo de comunicación RS485 y RS232, haciendo uso de un interruptor que se encuentra en un costado lateral como se observa en la figura 25.

Figura 24. USB Dynamixel con actuadores



Figura 25. Interruptor de tipo de comunicación



La comunicación se efectúa mediante tramas de datos de instrucción y de estado, donde las instrucciones son todos aquellos comandos enviados desde el ordenador para la interacción del actuador; por otro lado, las tramas de estado son las enviadas por el actuador para indicar el estado de diferentes parámetros de los cuales necesitamos cierta información. El retorno de este paquete de estados se da en un tiempo de 2 μ s, tiempo posterior a la recepción del paquete de instrucciones donde se solicita dicho estado.

CAPÍTULO 5

INTERFAZ GRAFICA DEL MANIPULADOR

5.1. INTERFAZ GRAFICA DE USUARIO GUI

Con el fin de poder tener una representación virtual del sistema articulado que permita observar los cambios en tiempo real, se hace uso nuevamente del software Simulink de Matlab junto con el toolbox Sinmechanics; toolbox que permite importar diseños de modelamientos mecánicos que fueron previamente elaborados en Autodesk Inventor y Solid Works, en los que se definen las masas, inercias y restricciones mecánicas de los elementos. Como se puede observar en la Figura 26 y 27.

Figura 26. Diagrama de bloques, Modelo dinámico del manipulador de 3GDL

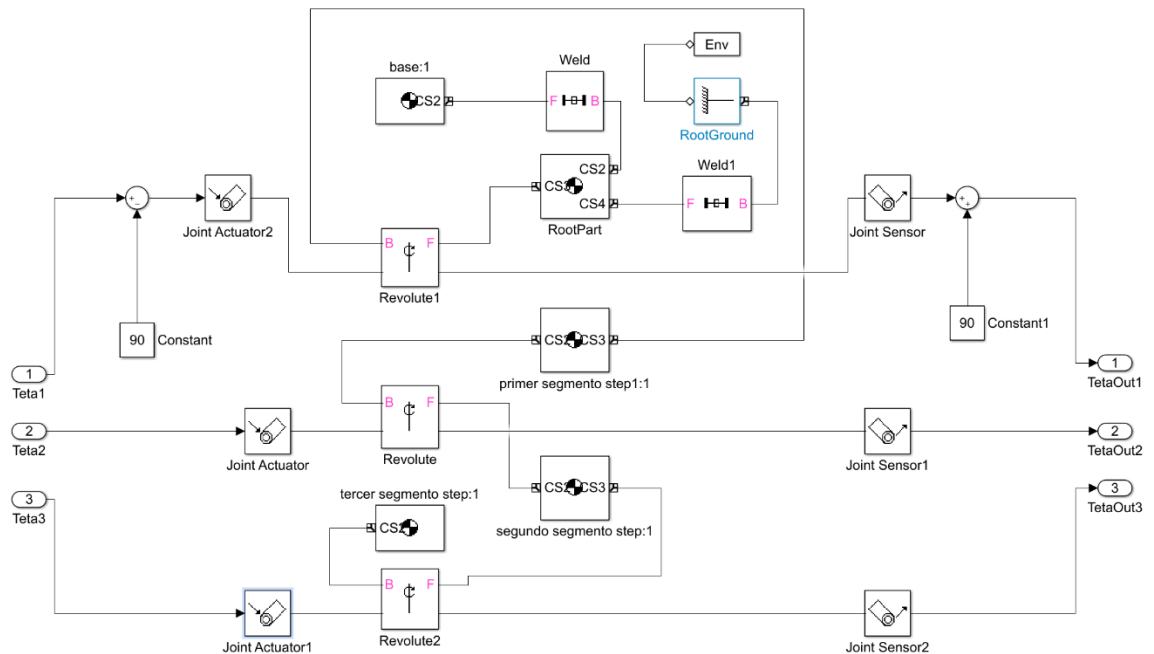
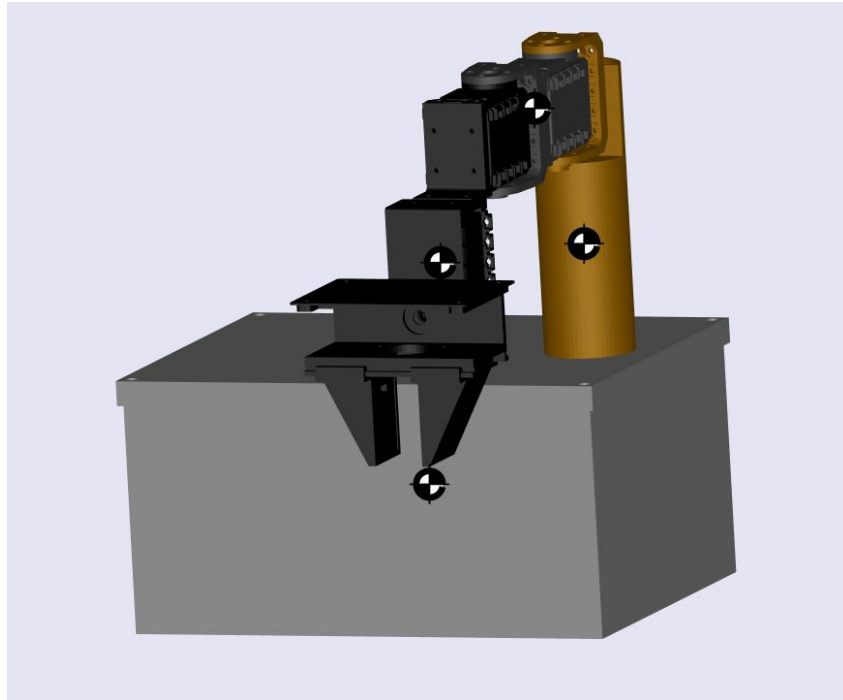
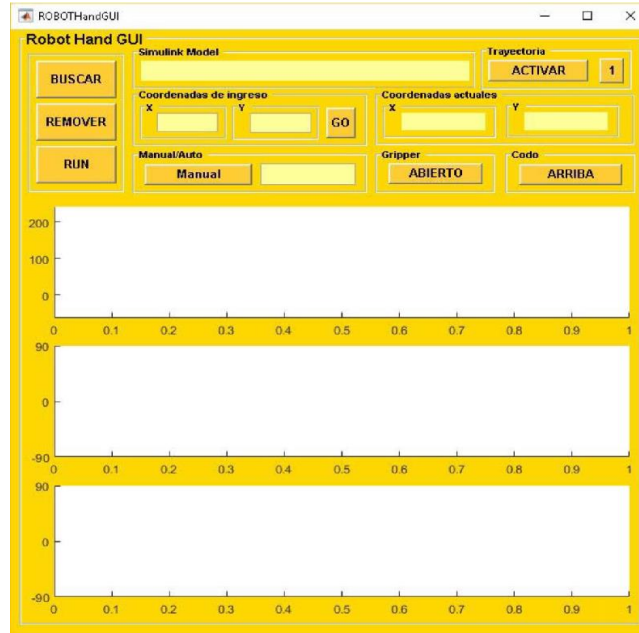


Figura 27. Simulación virtual del manipulador



A esta representación gráfica se le integra la interfaz gráfica de usuario (GUI), la cual permite modificar los parámetros del manipulador con el fin de alcanzar una posición deseada dentro del área de trabajo que lo define. De esta manera, se puede probar el posicionamiento del manipulador real en comparación al representado por Simulink de forma paralela. Ver Figura 28.

Figura 28. Interfaz gráfica de usuario GUI



5.2. GENERACION DE TRAYECTORIAS

Para llevar a cabo el control de seguimiento de trayectorias del manipulador tipo se hace uso de la llamada “*trayectoria continua*”, que consiste en la determinación de una serie de puntos que describen una curva o trayecto dentro del área de trabajo en función del tiempo, esto con el fin de hacer pasar el extremo final del manipulador por esa trayectoria tan cerca como sea posible.

Se plantean trayectorias simples que sean diferenciables como la trayectoria circular, la cual permite el análisis del comportamiento del robot durante su seguimiento.

Para el caso de la trayectoria circular, los valores están dados por:

$$x_d = l * \cos(t) + a \quad (35)$$

$$y_d = l * \sin(t) + b \quad (36)$$

Donde l es el radio del círculo deseado, a y b son las coordenadas del centro del círculo, y t es el tiempo.

CAPITULO 6

PRUEBAS DE OPERACIÓN DEL MANIPULADOR

7.1 ANALISIS DE LAS TRAYECTORIAS EJECUTADAS POR EL MANIPULADOR

Los puntos mostrados en la tabla 6, representan la trayectoria circular real y experimental del manipulador, con las cuales se construye el gráfico de la figura 29, donde se aprecia el comparativo entre ambas.

Tabla 6. Trayectoria de prueba para el manipulador de 3 gdl

Trayectoria real circular		Trayectoria experimental circular	
Abscisa	Ordenada	Abscisa	Ordenada
35.00	165.00	34.10	165.60
32.34	178.39	34.19	178.10
24.75	189.75	25.07	190.10
13.39	197.34	13.13	197.70
0.00	200.00	-0.97	200.30
-13.39	197.34	-13.12	197.70
-24.75	189.75	-25.20	189.90
-32.34	178.39	-33.86	178.80
-35.00	165.00	-34.42	165.60
-32.34	151.61	-32.31	152.10
-24.75	140.25	-25.46	141.30
-13.39	132.66	-14.26	133.90
0.00	130.00	-0.31	130.30
13.39	132.66	13.03	133.40
24.75	140.25	24.25	141.10
32.34	151.61	31.05	152.70
35.00	165.00	36.56	164.40

Figura 29. Gráfica comparativa trayectoria circular real y experimental

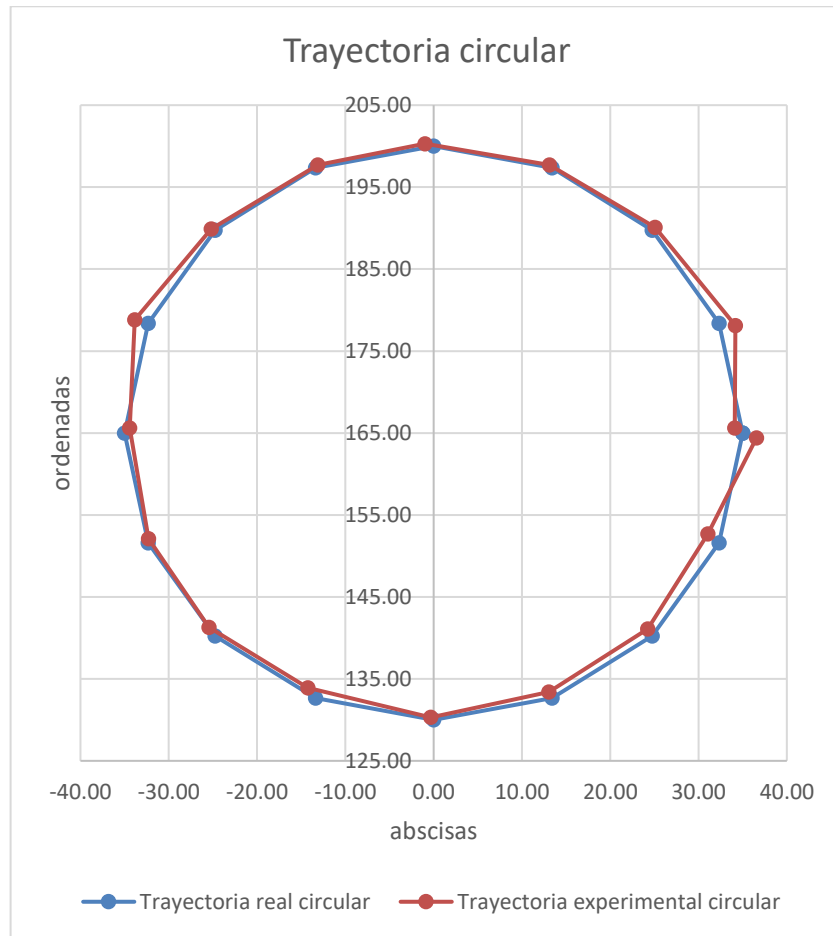


Tabla 7. Posición real y experimental de los puntos correspondientes a la trayectoria circular para cada articulación.

Ángulos obtenidos de cada articulación para la trayectoria circular								
Ángulos $\Theta 1$			Ángulos $\Theta 2$			Ángulos $\Theta 3$		
Ángulos reales	Ángulos experimentales	Error absoluto	Ángulos reales	Ángulos experimentales	Error absoluto	Ángulos reales	Ángulos experimentales	Error absoluto
130.90	130.60	-0.30	-24.08	-23.84	0.24	-58.8	-58.63	0.17
120.50	119.80	-0.70	-18.36	-18.15	0.21	-46.19	-45.44	0.75
115.10	114.40	-0.70	-18.55	-18.15	0.40	-30.56	-30.44	0.12
108.20	107.50	-0.70	-14.56	-13.95	0.61	-17.67	-17.25	0.42
105.10	104.50	-0.60	-9.84	-9.45	0.40	-12.24	-11.85	0.39
109.70	108.70	-1.00	-4.77	-4.05	0.72	-21.96	-21.44	0.52
120.00	119.50	-0.50	-3.70	-3.45	0.25	-36.14	-36.14	0.00
133.90	133.60	-0.30	-7.93	-7.35	0.58	-50.01	-49.94	0.07
141.20	140.50	-0.70	-4.58	-4.35	0.23	-65.58	-65.53	0.05
161.60	161.20	-0.40	-23.02	-23.34	-0.32	-72.54	-72.43	0.11
162.80	162.40	-0.40	-19.06	-18.45	0.61	-84.78	-85.03	-0.25
165.90	165.40	-0.50	-23.43	-23.24	0.19	-90.47	-89.83	0.64
159.70	159.10	-0.60	-20.79	-20.54	0.25	-93.88	-94.02	-0.14
148.60	148.00	-0.60	-15.59	-15.15	0.44	-93.03	-92.83	0.20
143.00	142.60	-0.40	-19.33	-18.75	0.58	-84.67	-84.43	0.24
138.60	138.10	-0.50	-24.49	-23.84	0.65	-72.08	-71.83	0.25
116.70	115.90	-0.80	-3.74	-3.15	0.60	-65.92	-65.83	0.09
Media aritmética		-0.57	Media aritmética		0.39	Media aritmética		0.21
Desviación estándar		0.19	Desviación estándar		0.26	Desviación estándar		0.26

Las figuras 30, 31 y 32, muestran las posiciones articulares reales y experimentales del manipulador para una trayectoria circular. Estas figuras muestran la validez del modelo matemático de la cinemática inversa empleada para el control de posición del manipulador didáctico de 3 gdl.

Figura 30. Trayectoria circular para la posición articular del actuador del primer gdl

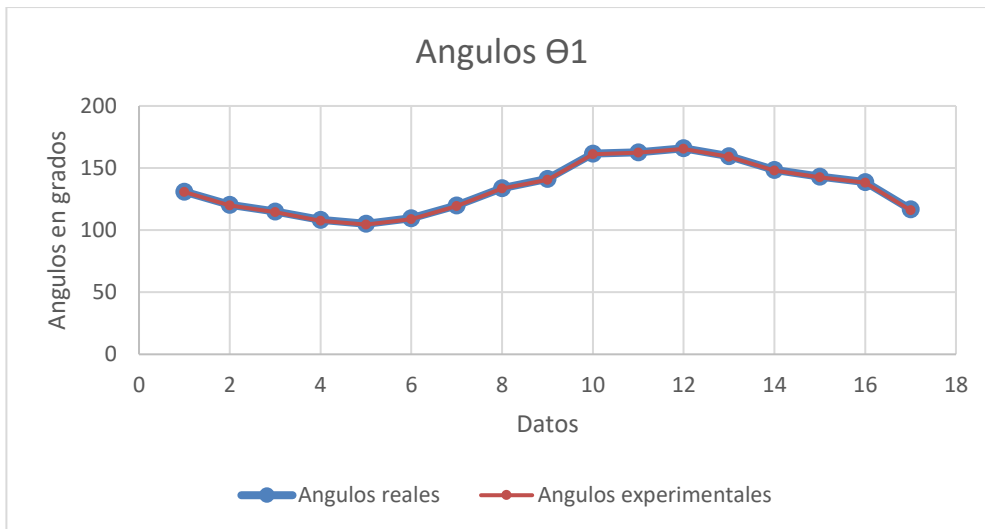


Figura 31. Trayectoria circular para la posición articular del actuador del segundo gdl

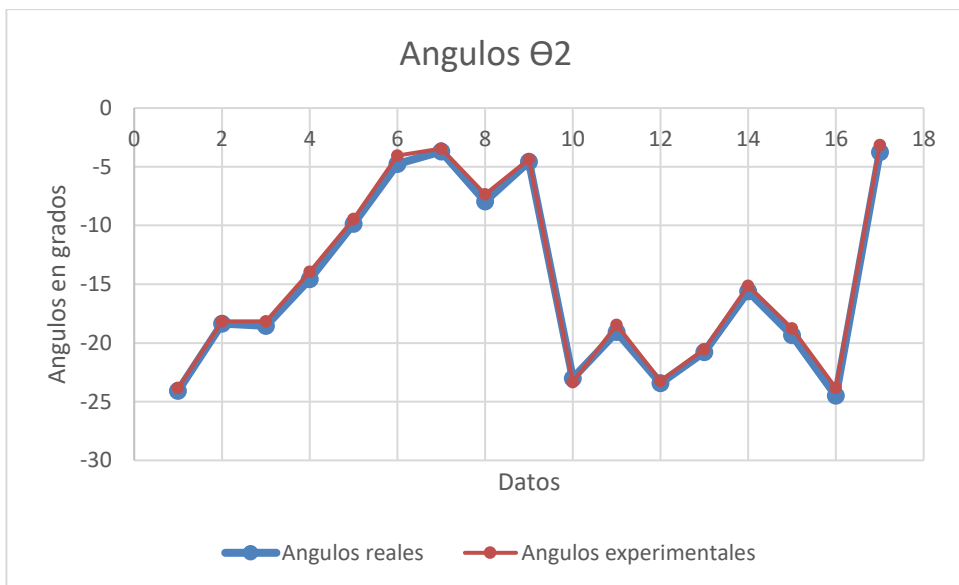
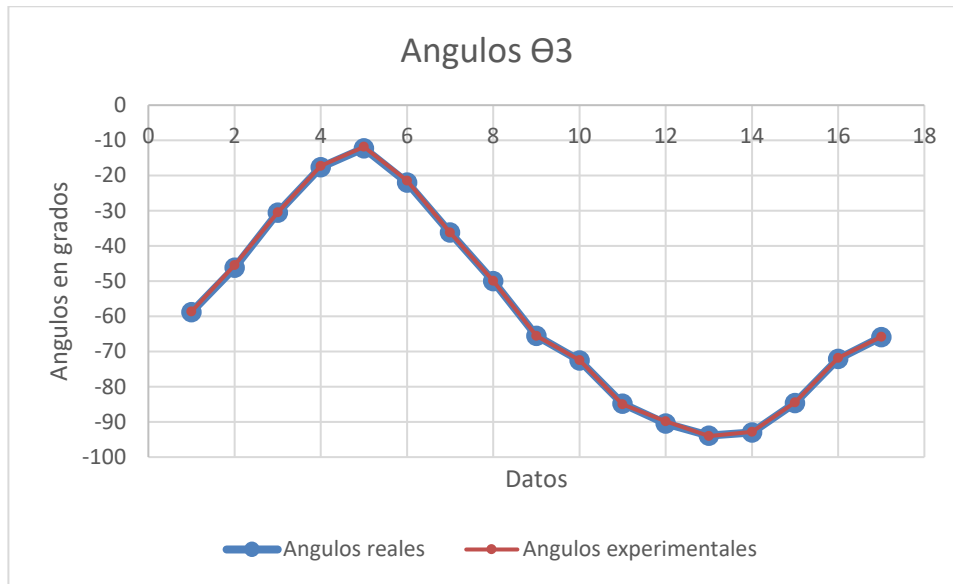


Figura 32. Trayectoria circular para la posición articular del actuador del tercer gdl



Al analizar las trayectorias observadas en las figuras anteriores se puede resaltar lo siguiente:

- La diferencia entre las muestras reales y experimentales obtenidas para cada articulación son mínimas, siempre y cuando las trayectorias se encuentren en el espacio de trabajo asignado y cuando la trayectoria programa no exija cambios bruscos en los actuadores. Esto se puede corroborar en la tabla 7, en donde la media aritmética de las muestras de cada articulación es casi nula y su desviación estándar no se aleja de dicha media.
- Cuando se presentan variaciones bruscas en la trayectoria, se observan mayores diferencias angulares en las muestras reales y experimentales; esto debido a que con los cambios bruscos el sistema presenta una oscilación que afecta la precisión en el posicionamiento del articulado

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

- La implementación del método Denavit-Hartenberg y del método geométrico para la obtención de los parámetros cinemáticos directos y cinemáticos inversos del robot respectivamente, determinan en conjunto el modelo matemático que describe en su totalidad el comportamiento del manipulador tipo SCARA de 3 gdl en función de sus características mecánicas, siendo viable para ser programado y por ende controlado en Simulink.
- La implementación del sistema de control en base de la cinemática inversa del manipulador de 3 gdl tipo SCARA, que opera directamente sobre los actuadores con ayuda del software Simulink y el protocolo de comunicación serial, comprueba la validez del análisis geométrico realizado para la generación de trayectorias. Este comportamiento se puede observar en las gráficas obtenidas de la posición angular para el seguimiento de la trayectoria circular.
- La implementación de la interfaz gráfica permite analizar el comportamiento cinemático y dinámico de este tipo de manipuladores de una forma interactiva y cómoda para el usuario, facilitando la modificación de valores preestablecidos de las características cinemáticas y dinámicas del robot tipo SCARA. Lo que conlleva a crear y probar trayectorias y estrategias de control para mejorar el desempeño del manipulador en tareas específicas.
- Durante las pruebas realizadas al manipulador DE 3 gdl tipo SCARA, se aprecia la versatilidad y eficiencia de este tipo de arquitecturas, ya que permite alcanzar un punto en el área de trabajo con diferentes configuraciones de sus articulaciones.

7.2. RECOMENDACIONES

- Desarrollar la dinámica del manipulador de 3 gdl tipo SCARA, para implementar diferentes estrategias de control dinámico que se ajusten a las condiciones particulares de trabajo de este tipo de robots y así disminuir criterios importantes como la presencia de cambios bruscos en el seguimiento de trayectorias al tener en cuenta los efectos de fricción y aceleraciones de los centros de masa de los eslabones.
- Instrumentar al robot SCARA con sensores en cada uno de sus eslabones y articulaciones que permitan comparar los parámetros de posición, velocidad, y aceleración de los centros de masa y demás componentes, e incluir estas variables en un esquema de control más robusto para estimar y mejorar criterios de precisión, mas aun, cuando este tipo de manipuladores pierde precisión debido al número de ciclos de trabajo.
- Proporcionar al manipulador un equipo de cómputo dedicación exclusivamente a las tareas de control, para que permita responder mucho mas eficientemente a los procesos y condiciones de operación de este.

Bibliografía

- APARICIO GONZÁLEZ, M. H., & ORJUELA PARRA, J. C. (2005). *Control para un brazo de robot colocado sobre la plataforma móvil URSULA*. Bogota, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- BARRIENTOS, A., PEÑIN, L. F., & BALAGUER, C. y. (2007). *Fundamentos de robotica* (Vol. 2). McGraw-Hill.
- BATURONE, A. (2005). *Robotica: manipuladores y robots moviles*. Marcombo. Obtenido de <https://books.google.cl/books?id=TtMfuy6FNCc>
- FU, K. a. (1994). *Robotica: control, deteccion, vision e inteligencia*. McGraw-Hill. Obtenido de <https://books.google.cl/books?id=UA31PQAACAAJ>
- GONZALES DE DURANA, J. M. (2002). *Automatización de Procesos Industriales*. (Repaso Teoría de Control). (Vitoria-Gasteiz, Ed.) Dpto. I.S.A., EUITI e ITT - UPV/EHU.
- GONZALEZ, V., & LOPEZ, A. y. (2004). *Control y Robótica, Curso 2003-2004*. (U. d. Valladolid, Ed.) Obtenido de http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/ctrl_rob/index.htm
- KELLY, R. a. (2003). *Control de movimiento de robots manipuladores*. Pearson Educacion. Obtenido de <http://books.google.cl/books?id=LPwMAAAACAAJ>
- MARIN LÓPEZ, A. A., & BEDOYA GONZALEZ, A. J. (2013). *Diseño y control multivariable de un helicóptero de dos grados de libertad*. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.
- MAZZONE, V. (2002). *Control Automatico 1*. quiles: Universidad Nacional de Quilmes.
- OLIER CAPARROSO, I., AVILÉS, O., & HERNÁNDEZ BELLO, J. (1999). *Una introducción a la Robótica Industrial*. 53-67.
- RAMIREZ, J., & RUBIANO, A. (2012). *Modelamiento matematico de la cinematica directa e inversa de un robot manipulador de tres grados de libertad*. *INGENIERIA SOLIDARIA*, 8(15).
- ROBOTIS. (2006). *Dynamixel AX-12. User's Manual*.
- ROSSI, A. B. (2012). *Modelado de Caden as Cinematicas mediante Matrices de Desplazamiento. Una alternativa al metodo de Denavit-Hartenberg*. 9(4), 371-382.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2012.09.004>
- S.A, V. I. (2017). *Vinssa*. Obtenido de <http://vinssa.com/robot-scara>
- ZABALA, G. (2010). *Robotica. Usershop*. Obtenido de <http://books.google.com.co/books?id=JPgyRgn-j1YC>

ANEXO

1. Datasheet del motor interno en los servomotores



DC-Micromotors

Precious Metal Commutation

4,5 mNm

6 W

Series 1724 ... SR

Values at 22°C and nominal voltage	1724 T	003 SR	006 SR	012 SR	018 SR	024 SR	
1 Nominal voltage	U_n	3	6	12	18	24	V
2 Terminal resistance	R	0,78	3,41	15,2	32,1	54,6	Ω
3 Efficiency, max.	η_{max}	82	81	80	81	81	%
4 No-load speed	n_0	8 200	8 500	7 900	8 400	8 600	min ⁻¹
5 No-load current, typ. (with shaft \varnothing 1,5 mm)	I_0	0,038	0,02	0,009	0,006	0,005	A
6 Stall torque	M_s	13,2	11,5	10,5	11,2	11,5	mNm
7 Friction torque	M_f	0,13	0,13	0,13	0,12	0,13	mNm
8 Speed constant	k_n	2 760	1 450	656	472	362	min ⁻¹ /V
9 Back-EMF constant	k_E	0,362	0,59	1,5	2,12	2,76	mV/min ⁻¹
10 Torque constant	k_M	3,46	6,59	14,3	20,2	26,3	mNm/A
11 Current constant	k_I	0,289	0,152	0,07	0,049	0,038	A/mNm
12 Slope of n-M curve	$\Delta n / \Delta M$	621	748	752	750	748	min ⁻¹ /mNm
13 Rotor inductance	L	21	75	360	710	1 200	μ H
14 Mechanical time constant	τ_m	8	8	8	8	8	ms
15 Rotor inertia	J	1,2	1	1	1	1	gcm ²
16 Angular acceleration	α_{max}	110	110	100	100	100	$\cdot 10^3$ rad/s ²
17 Thermal resistance	$R_{\theta st} / R_{\theta \Delta}$	4 / 24,5					K/W
18 Thermal time constant	$\tau_{th} / \tau_{th \Delta}$	2,6 / 270					s
19 Operating temperature range:		-30 ... +85 (optional version -55 ... +125)					°C
– motor		+125					°C
– winding, max. permissible							
20 Shaft bearings		sintered bearings					ball bearings, preloaded
21 Shaft load max.:		(standard)					(optional version)
– with shaft diameter		1,5					1,5
– radial at 3 000 min ⁻¹ (3 mm from bearing)		1,2					5
– axial at 3 000 min ⁻¹		0,2					0,5
– axial at standstill		20					10
22 Shaft play:							
– radial	\leq	0,03					0,015
– axial	\leq	0,2					0
23 Housing material		steel, black coated					
24 Mass		27					g
25 Direction of rotation		clockwise, viewed from the front face					
26 Speed up to	n_{max}	10 000					min ⁻¹
27 Number of pole pairs		1					
28 Magnet material		NdFeB					

Rated values for continuous operation

29 Rated torque	M_n	2,3	4,2	4,5	4,5	4,5	mNm
30 Rated current (thermal limit)	I_n	0,7	0,7	0,35	0,25	0,19	A
31 Rated speed	n_n	6 790	4 720	3 430	3 950	4 220	min ⁻¹

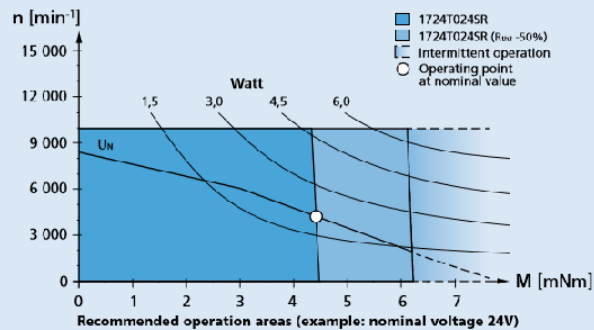
Note: Rated values are calculated with nominal voltage and at a 22°C ambient temperature. The $R_{\theta \Delta}$ value has been reduced by 0%.

Note:

The diagram indicates the recommended speed in relation to the available torque at the output shaft for a given ambient temperature of 22°C.

The diagram shows the motor in a completely insulated as well as thermally coupled condition ($R_{\theta \Delta}$ 50% reduced).

The nominal voltage (U_n) curve shows the operating point at nominal voltage in the insulated and thermally coupled condition. Any points of operation above the curve at nominal voltage will require a higher operating voltage. Any points below the nominal voltage curve will require less voltage.



For notes on technical data and lifetime performance refer to "Technical Information".
Edition 2017

© DR. FRITZ FAULHABER GMBH & CO. KG
Specifications subject to change without notice.
www.faulhaber.com

2. Parámetros controlables en la familia Dynamixel AX-12

3-4. Control Table

EEPROM Area

RAM Area

Address	Item	Access	Initial Value
0(0X00)	Model Number(L)	RD	12(0x0C)
1(0X01)	Model Number(H)	RD	0(0x00)
2(0X02)	Version of Firmware	RD	?
3(0X03)	ID	RD,WR	1(0x01)
4(0X04)	Baud Rate	RD,WR	1(0x01)
5(0X05)	Return Delay Time	RD,WR	250(0xFA)
6(0X06)	CW Angle Limit(L)	RD,WR	0(0x00)
7(0X07)	CW Angle Limit(H)	RD,WR	0(0x00)
8(0X08)	CCW Angle Limit(L)	RD,WR	255(0xFF)
9(0X09)	CCW Angle Limit(H)	RD,WR	3(0x03)
10(0x0A)	(Reserved)	-	0(0x00)
11(0X0B)	the Highest Limit Temperature	RD,WR	85(0x55)
12(0X0C)	the Lowest Limit Voltage	RD,WR	60(0X3C)
13(0X0D)	the Highest Limit Voltage	RD,WR	190(0xBE)
14(0X0E)	Max Torque(L)	RD,WR	255(0xFF)
15(0X0F)	Max Torque(H)	RD,WR	3(0x03)
16(0X10)	Status Return Level	RD,WR	2(0x02)
17(0X11)	Alarm LED	RD,WR	4(0x04)
18(0X12)	Alarm Shutdown	RD,WR	4(0x04)
19(0X13)	(Reserved)	RD,WR	0(0x00)
20(0X14)	Down Calibration(L)	RD	?
21(0X15)	Down Calibration(H)	RD	?
22(0X16)	Up Calibration(L)	RD	?
23(0X17)	Up Calibration(H)	RD	?
24(0X18)	Torque Enable	RD,WR	0(0x00)
25(0X19)	LED	RD,WR	0(0x00)
26(0X1A)	CW Compliance Margin	RD,WR	0(0x00)
27(0X1B)	CCW Compliance Margin	RD,WR	0(0x00)
28(0X1C)	CW Compliance Slope	RD,WR	32(0x20)
29(0X1D)	CCW Compliance Slope	RD,WR	32(0x20)
30(0X1E)	Goal Position(L)	RD,WR	[Addr36]value
31(0X1F)	Goal Position(H)	RD,WR	[Addr37]value
32(0X20)	Moving Speed(L)	RD,WR	0
33(0X21)	Moving Speed(H)	RD,WR	0
34(0X22)	Torque Limit(L)	RD,WR	[Addr14] value
35(0X23)	Torque Limit(H)	RD,WR	[Addr15] value
36(0X24)	Present Position(L)	RD	?
37(0X25)	Present Position(H)	RD	?
38(0X26)	Present Speed(L)	RD	?
39(0X27)	Present Speed(H)	RD	?
40(0X28)	Present Load(L)	RD	?
41(0X29)	Present Load(H)	RD	?
42(0X2A)	Present Voltage	RD	?
43(0X2B)	Present Temperature	RD	?
44(0X2C)	Registered Instruction	RD,WR	0(0x00)
45(0X2D)	(Reserved)	-	0(0x00)
46(0x2E)	Moving	RD	0(0x00)
47(0x2F)	Lock	RD,WR	0(0x00)
48(0x30)	Punch(L)	RD,WR	32(0x20)
49(0x31)	Punch(H)	RD,WR	0(0x00)

3. Manipulador físico (terminado)

Figura 33. Manipulador físico

